

Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра “Машинобудування, мехатроніки і робототехніки”

«Допущено до захисту»
Завідувач кафедри ММіР
к.т.н., доцент
_____ Андрій ГРЕЧКА
«_____» _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему:

**«Розробка технології обробки корпусу
із дослідженням процесу фрезерування»
«Development of the processing technology for the housing with a study of the milling
process»**

Виконав здобувач вищої освіти 2-го року
магістратури групи ПМ-23М-3
ОПП «Прикладна механіка»
спеціальності 131 «Прикладна механіка»
_____ Віталій МОСКАЛЕНКО

Керівник роботи к.т.н., доцент
_____ Олександр СКІБІНСЬКИЙ

Рецензент: _____

Кропивницький – 2024

Центральноукраїнський національний технічний університет	
Факультет	Механіко-технологічний
Кафедра	Машинобудування, мехатроніки і робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Галузь знань	13 Механічна інженерія
Спеціальність	131 Прикладна механіка
Освітньо-професійна програма	Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ММР
_____ Андрій ГРЕЧКА

« ____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА

Віталія МОСКАЛЕНКА

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Розробка технології обробки корпусу із дослідженням процесу фрезерування

2. Керівник роботи: _____ к.т.н., доц., Олександр СКІБІНСЬКИЙ

3. Строк подання роботи до захисту « ____ » _____ 2024 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи:

Метою роботи є: дослідження процесу фрезерування з розробкою технології обробки корпусу.

Завдання:

- виконати опис процесу фрезерної обробки та фрезерування отворів;
- дослідити: особливості траєкторії руху інструменту під час обробки отворів фрезеруванням; параметри обробки, режими різання; сили, що виникають в процесі фрезерування отворів та їх вплив на якість та точність оброблюваних отворів.
- проаналізувати базовий технологічний процес виготовлення деталі корпус, виявити його переваги та недоліки, розробити прогресивний технологічний процес, який буде містити фрезерну обробку отворів, вибрати металорізальні верстати, затискні, допоміжні та контрольні пристрої, розрахувати припуски, режими різання та норми часу;
- виконати необхідні економічні розрахунки.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
РОЗДІЛ 1	Олександр СКІБІНСЬКИЙ		
РОЗДІЛ 2	Олександр СКІБІНСЬКИЙ		
РОЗДІЛ 3	Олександр СКІБІНСЬКИЙ		
РОЗДІЛ 4	Ірина ЖУРИЛО		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п / п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	При- мітка
1	ВСТУП	Вересень 2024	вик.
2	РОЗДІЛ 1	Вересень-жовтень 2024	вик.
3	РОЗДІЛ 2	Жовтень 2024	вик.
4	РОЗДІЛ 3	Жовтень-листопад 2024	вик.
5	РОЗДІЛ 4	Листопад 2024	вик.
6	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	Листопад-грудень 2024	вик.
7	Графічна частина	Листопад-грудень 2024	вик.

Дата видачі завдання «_____» _____ 2024 р.

Керівник роботи _____ Олександр СКІБІНСЬКИЙ
(підпис)

Завдання прийнято до виконання «_____» _____ 2024 р.

Здобувач _____ Віталій МОСКАЛЕНКО
(підпис)

Анотація

Москаленко В.С. Розробка технології обробки корпусу із дослідженням процесу фрезерування: кваліфікаційна робота для освітнього ступеня «магістр»: спец. 131 «Прикладна механіка» / наук. кер. О. І. Скібінський; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2024. – 83 с. Матеріали презентації 11 креслень.

Метою роботи є дослідження процесу фрезерування отворів, траєкторії руху інструменту під час обробки, досягаємої точності та шорсткості оброблених отворів.

В роботі виконано дослідження процесу фрезерування та зосереджено увагу на фрезерній обробці отворів. Проаналізовано особливості траєкторії руху інструменту під час фрезерування та розфрезерування отворів. Виконано аналіз відомих досліджень впливу режимів різання та сил різання на точність та якість обробки. Проаналізовано особливості конструкції різального інструменту для фрезерування отворів. Розглянуто процес стружкоутворення при фрезерній обробці отворів.

Виконано аналіз базового технологічного процесу обробки деталі корпус та виявлено його переваги та недоліки. Розроблено раціоналізований технологічний процес, для якого: вибрано заготовку, металорізальні верстати, затискні та вимірювальні пристрої, розраховано режими різання та норми часу. Розроблено рекомендації для обробки отворів деталі корпус із застосуванням розфрезерування методом гвинтової інтерполяції. Виконано необхідні економічні розрахунки.

Актуальність: дослідження процесу фрезерування та розфрезерування отворів, траєкторії руху фрези; аналіз впливу сил та режимів різання на точність та якість обробки.

Практичне значення: розроблені рекомендації для розфрезерування отворів корпусу; розроблено удосконалений технологічний процес виготовлення корпусу.

Ключові слова: фрезерування, розфрезерування отвору, гвинтова інтерполяція, осьова подача, радіальна подача, шорсткість.

Annotation

Vitalii MOSKALENKO. Development of the processing technology for the housing with a study of the milling process. Master's Thesis: CNTU, 2024. - 83 p. Presentation materials 11 il.

The purpose of the work is the research the process of milling holes, the trajectory of the tool during processing, the achievable accuracy and roughness of the processed holes.

The research of the milling process is carried out in the work and attention is focused on the milling of holes. The peculiarities of the trajectory of the tool during milling and helical milling of holes are analyzed. An analysis of known researches on the influence of cutting modes and cutting forces on the accuracy and quality of processing was performed. The features of the design of the cutting tool for milling holes are analyzed. The process of chip formation during milling of holes is considered.

An analysis of the basic technological process of processing the housing part was performed and its advantages and disadvantages were identified. A rationalized technological process has been developed, for which: the workpiece, metal cutting machines, clamping and measuring devices are selected, cutting modes and time standards are calculated. Recommendations have been developed for the processing of the holes of the housing part using helical milling interpolation method. Necessary economic calculations have been performed.

Relevance: the research of the process of milling and helical milling of holes, the trajectory of the milling cutter; analysis of the influence of forces and cutting modes on the accuracy and quality of processing.

Practical significance: developed recommendations for milling the holes of the case; an improved technological process of manufacturing the case has been developed.

Key words: milling, helical milling, helical milling interpolation, axial feed, radial feed, roughness.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. ПОНЯТТЯ ФРЕЗЕРУВАННЯ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	8
1.1. Поняття фрезерування, методи фрезерування.....	8
1.2. Постановка задач дослідження.....	15
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФРЕЗЕРУВАННЯ.....	16
2.1. Особливості та характеристики фрезерування отворів.....	16
2.2. Особливості та характеристики розфрезерування отворів.....	17
2.3. Режимі різання при розфрезеруванні отворів.....	22
2.4. Геометричні параметри фрез.....	27
2.5. Точність обробки при розфрезеруванні.....	30
2.6. Стружкоутворення та шорсткість при розфрезеруванні отворів.....	32
2.7. Висновки.....	40
РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЯ ОБРОБКИ ДЕТАЛІ КОРПУС.....	41
3.1. Службове призначення та характеристика корпусу.....	41
3.2. Розробка технології виготовлення корпусу.....	42
3.3. Висновки.....	61
РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ..	62
4.1. Розрахунок потрібної кількості обладнання та коефіцієнту його завантаження.....	62
4.2. Розрахунок календарно-планових нормативів.....	63
4.3. Визначення чисельності основних робітників цеху.....	66
4.4. Аналіз варіантів технологічного процесу.....	67
4.5. Розрахунок показників економічної ефективності обраного варіанту технологічного процесу.....	75
4.6. Розрахунок планової цехової собівартості деталі.....	76
4.7. Планування підсумкових техніко-економічних показників.....	78
4.8. Висновки.....	79
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	80
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	81

ВСТУП

Ринкова економіка створює динамічне середовище, де покращення якості продукції стає обов'язковою умовою для успішної діяльності. Завдяки конкуренції, вимогам споживачів і технологічному прогресу, виробники мають стимул розвивати свої товари, що сприяє загальному підвищенню стандартів якості.

Ключовим фактором успіху на сучасному ринку є конкурентоспроможність машинобудівної продукції. Вона характеризується сукупністю властивостей продукції, які забезпечують її перевагу над аналогами інших виробників. Основними аспектами конкурентоспроможності машинобудівної продукції є: використання прогресивних технологій, які забезпечують покращення властивостей продукції, оптимізації виробничих процесів за рахунок автоматизації, високі технічні характеристики, що гарантують безвідмовну роботу впродовж тривалого часу.

В роботі необхідно розглянути процес фрезерування. Виконати опис процесу фрезерування отворів. Дослідити особливості траєкторії руху інструменту під час обробки отворів фрезеруванням. Виконати аналіз відомих досліджень впливу режимів різання та сил різання на точність та якість обробки. Проаналізувати особливості конструкції різального інструменту для фрезерування отворів. Розглянути процес стружкоутворення при фрезеруванні отворів. Виконати аналіз базового технологічного процесу обробки деталі корпус та розробити раціоналізований технологічний процес, який забезпечить: скорочення кількості операцій механічної обробки, а відповідно, кількості та номенклатури металорізальних верстатів; скорочення часу на виготовлення деталі, зменшення кількості виробничих робітників та ін. При цьому, раціоналізований технологічний процес забезпечить якість та точність виготовленої за ним деталі, а також забезпечить зниження собівартості деталі. В розробленому технологічному процесі застосувати обробку отворів фрезеруванням, яка забезпечить необхідну точність та якість поверхонь, а також зменшення номенклатури різальних інструментів, які застосовуються для обробки деталі корпус.

РОЗДІЛ 1. ПОНЯТТЯ ФРЕЗЕРУВАННЯ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Поняття фрезерування, методи фрезерування

Фрезерування є одним із найрозповсюдженіших методів обробки металів різанням, адже, здатен забезпечити обробку широкої номенклатури поверхонь: плоских, криволінійних, зубчастих, рифлених, а також пазів, уступів, отворів, кишень, контурів. В якості різального інструменту виступає фреза – багатолезовий осьовий інструмент.

Для фрезерування плоских поверхонь застосовуються торцеві, кінцеві та циліндричні фрези (рис. 1.1).

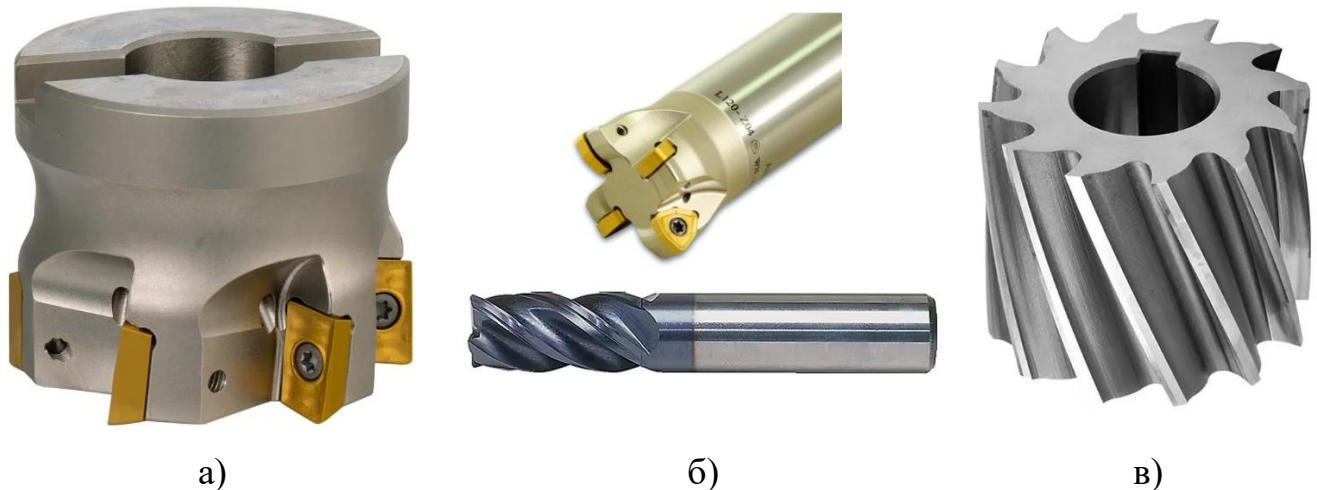


Рис. 1.1. Типи фрез:

а – торцева; б – кінцеві; в – циліндрична

В залежності від застосовуваного типу інструменту, виділяють такі методи фрезерування:

- торцеве;
- кінцеве.

Торцеве фрезерування застосовують при обробці плоских поверхонь, а кінцеве – при обробці пазів, уступів, вузьких площин, контурів.

При торцевому фрезеруванні можливо застосовувати два типи фрез – циліндричні та торцеві.

Фрезерування площин циліндричними фрезами виконується на горизонтально-фрезерних верстатах, при цьому циліндрична фреза встановлюється на оправку (рис. 1.2). Фреза обертається навколо власної осі, а рухом подачі є переміщення заготовки. Вісь фрези розташована паралельно оброблюваній поверхні (рис. 1.3). Циліндричні фрези працюють периферією, на якій розташовані різальні леза.

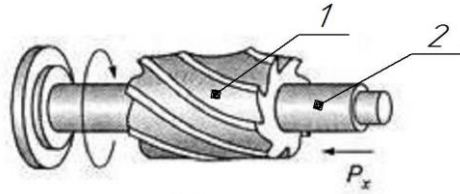


Рис. 1.2. Схема встановлення циліндричної фрези:

1 – фреза; 2 – оправка

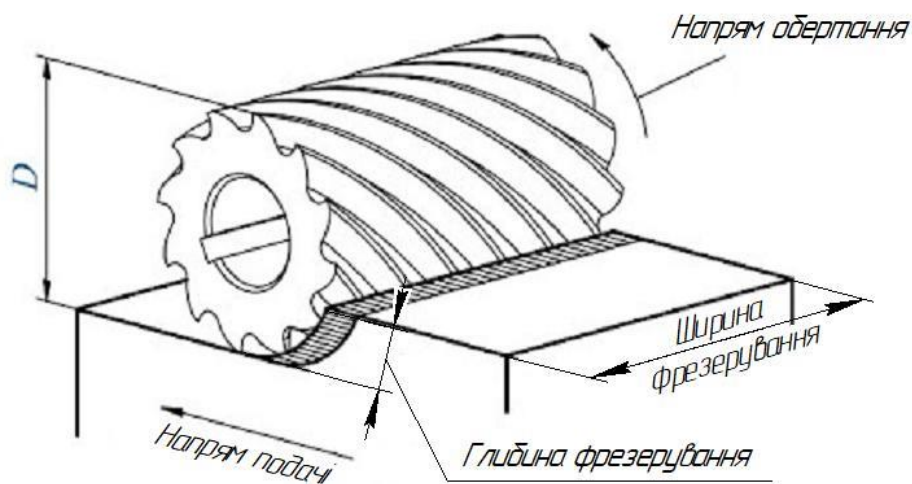
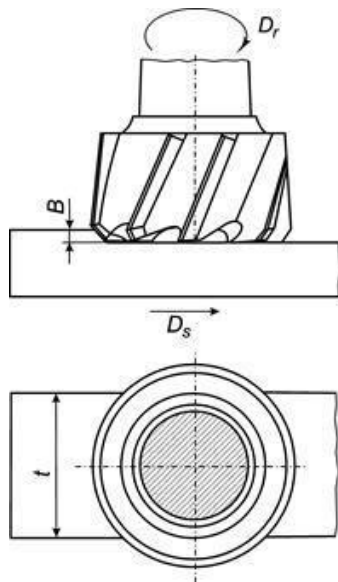


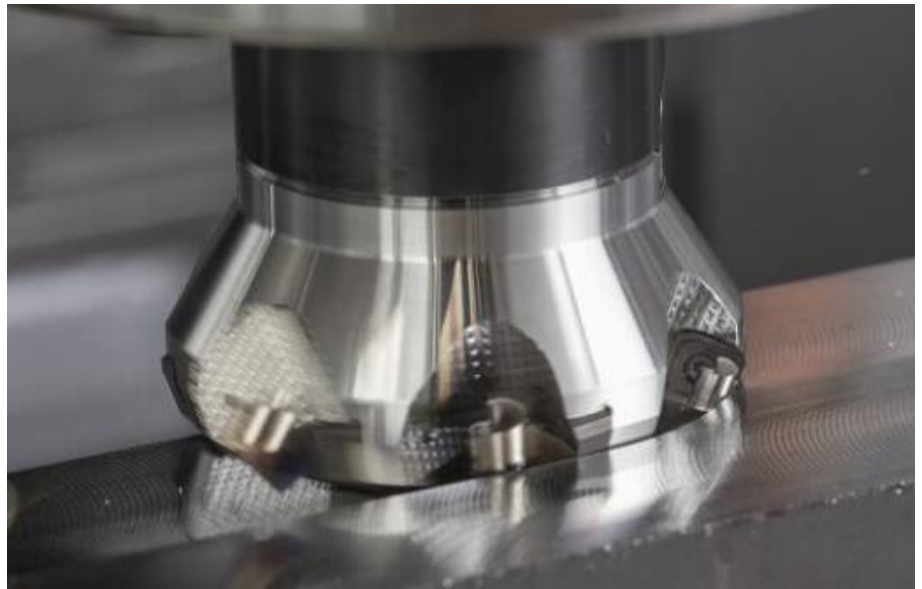
Рис. 1.3. Схема фрезерування циліндричною фрезою

Фрезерування площин торцевими фрезами виконується на вертикально-фрезерних верстатах. Вісь фрези розташована перпендикулярно до оброблюваної поверхні. Торцева фреза здійснює обертання навколо власної осі з одночасним переміщенням заготовки.

Торцеві фрези мають головні різальні кромки, розміщені на циліндричній поверхні (периферії) та допоміжні – на торцевій поверхні.



а)

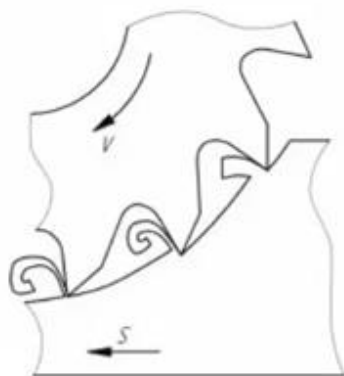


б)

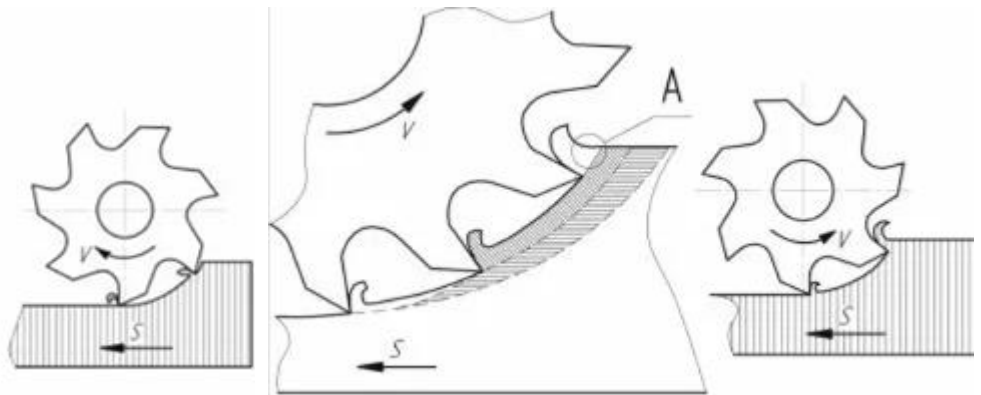
Рис. 1.4. Торцеве фрезерування:

а – схема; б – процес

Торцеве та циліндричне фрезерування буває попутним та зустрічним. При попутному фрезеруванні напрямок подачі збігається із напрямком обертання фрези (рис. 1.5, а). Зустрічне фрезерування характеризується протилежними напрямками подачі та обертання фрези (рис. 1.5, б). При попутному фрезеруванні, під час врізання, зубець одразу врізається на максимальну товщину зрізу. При зустрічному ж фрезеруванні, товщина зрізаємої зубцем стружки збільшується поступово від мінімальної до максимальної, що спричинює плавне зростання навантаження на зуб фрези.



а)



б)

Рис. 1.5. Способи фрезерування:

а – попутне; б – зустрічне

Обидва способи фрезерування мають свою область застосування та переваги і недоліки. При зустрічному фрезеруванні, виникають сили різання, які намагаються відірвати деталь від столу верстата або затискного пристрою, що погіршує точність обробки. При цьому, оскільки врізання в матеріал відбувається не з більш ущільненого поверхневого шару, а з нещільного (підкіркового), навантаження на зуб фрези збільшується плавно. Поступове збільшення поперечного перерізу зрізаемого шару металу теж сприяє плавності процесу. Це все позитивно впливає на термін служби фрези. Зустрічне фрезерування, як правило, застосовують при чорновій обробці.

Попутне фрезерування характеризується різким навантаженням зубця фрези в момент врізання в оброблювану поверхню. Такий характер роботи фрези призводить до його підвищеного зношування. При цьому, сили, які діють в зоні різання, притискають фрезу до заготовки, а заготовку до площини встановлення, що збільшує жорсткість і точність обробки та покращує якість обробки. Попутне фрезерування застосовують при чистовій обробці.

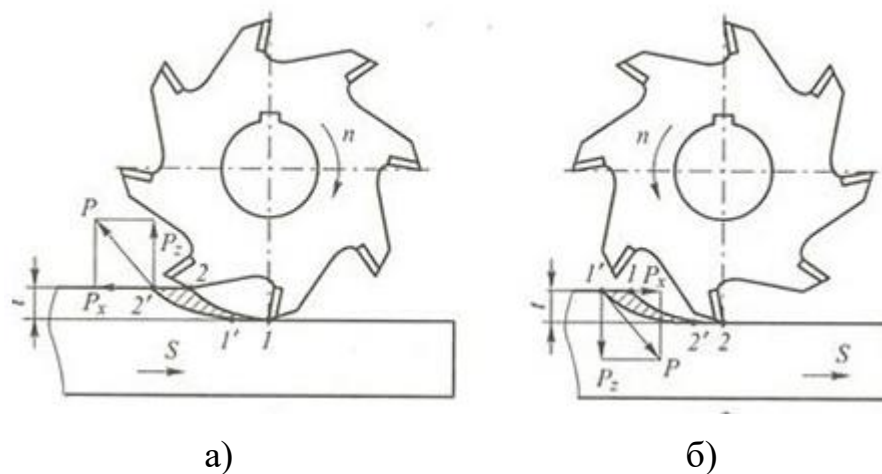


Рис. 1.6. Схема сил різання при фрезеруванні:
а – зустрічному; б – попутному

При порівнянні торцевого і циліндричного фрезерування можна зробити такі висновки:

- торцеві фрези працюють більш плавно через одночасну роботу більшої кількості зубців інструменту;

- рівномірність роботи торцевих фрез краща за рахунок більшої довжини дуги контакту;
- торцеві фрези забезпечують меншу шорсткість поверхні;
- торцеві фрези не вимагають довгих оправок, як циліндричні, при їх встановленні.

Кінцеве фрезерування застосовується для обробки: площин, торців, уступів, пазів, кишень, контурів та отворів (рис. 1.7). Зуб кінцевої фрези має головну різальну кромку на циліндричній (периферійній) частині, допоміжну різальну кромку на торцевій частині, а також перехідну – між головною і допоміжною різальними кромками. Під час обробки виконуються такі рухи: обертання фрези навколо власної осі та рух подачі вздовж оброблюваної поверхні (рис.1.8).

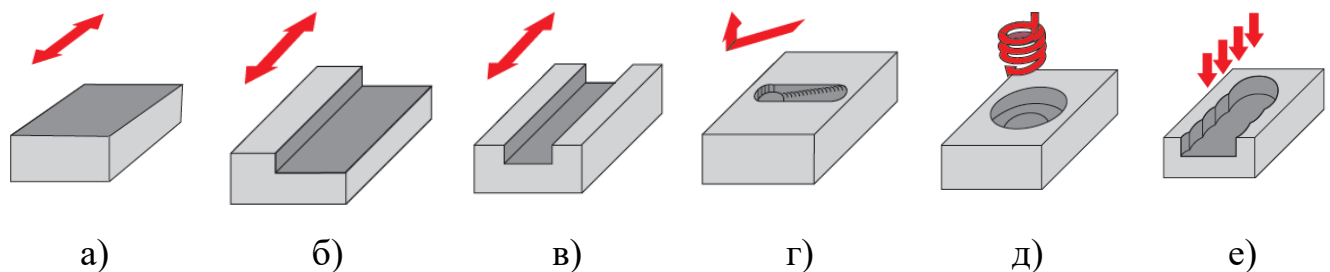


Рис. 1.7. Поверхні, які оброблюються кінцевими фрезами:

а – площина; б – уступ; в – паз; г – похилий паз; д – отвір; е – кишеня

Метод кінцевого фрезерування забезпечує формоутворення великої множини різних форм і профілів і застосовується, як в якості фінішного методу обробки поверхонь, так і для виготовлення поверхонь, які підлягатимуть подальшій механічній обробці.

Вибір типу та розміру фрези залежить від різних факторів: стадії обробки (чорнова або чистова), геометрії виготовляємої поверхні, траєкторії руху інструменту при фрезеруванні. Кінцева фреза може виступати в якості мірного інструменту, тобто коли її діаметр забезпечує необхідну ширину фрезерування, наприклад при фрезеруванні пазу. В такому випадку, вибір типорозміру фрези залежить саме від параметрів пазу, заданих на кресленні деталі. У випадках, коли кінцевою фрезою оброблюються торці, уступи, кишені, контури, отвори, параметри фрези залежать від

особливостей обробки. До переваг фрезерування кінцевими фрезами відноситься можливість виготовлення складних 3Д контурів та поверхонь.

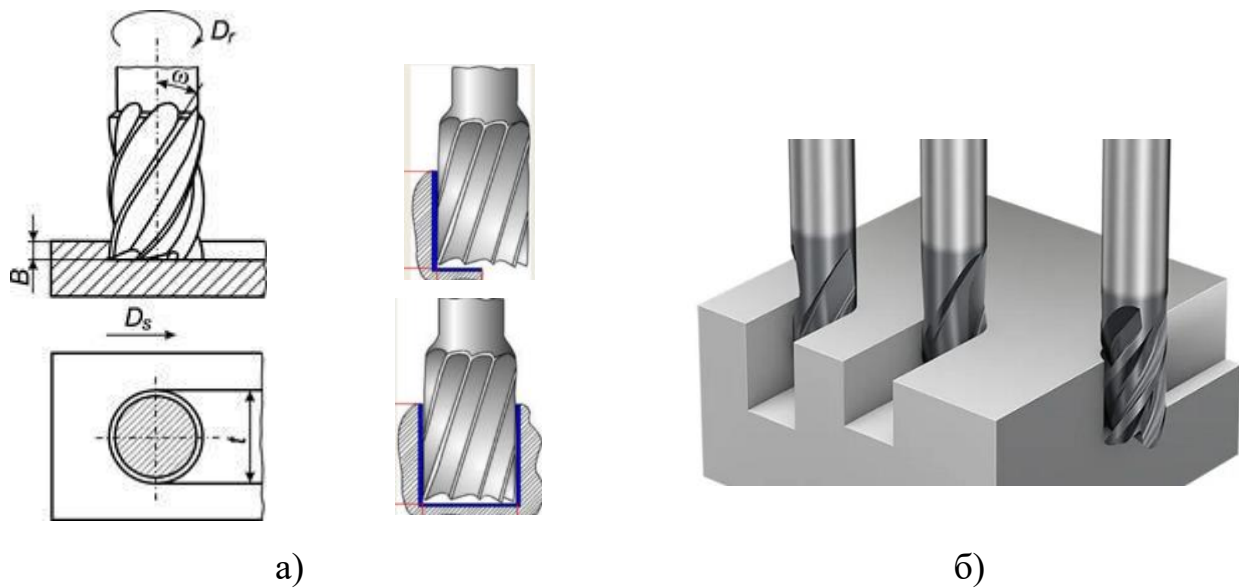


Рис. 1.8. Фрезерування:
а – схема; б – процес

Кінцеве фрезерування виконується способом попутного фрезерування. Відбувається одночасне різання металу, як периферією інструмента, так і торцем. Існують цільні та збірні кінцеві фрези (рис. 1.9).



Рис. 1.9. Кінцеві фрези:
а – цільна; б – збірна

Суттєвою конструктивною відмінністю є форма та розташування зубців фрез. Цільні кінцеві фрези мають гвинтові зубці, збірні кінцеві фрези – прямозубі. Під час механічної обробки гвинтовий зуб фрези плавніше врізається в метал, без вібрації. На відміну від прямозубої фрези, кожен зуб якої врізається з ударом. Довжина контакту

гвинтового зубця із оброблюваною поверхнею довша ніж у змінної різальної пластини. Завдяки цьому, можна збільшувати режими різання такі, як подачу та швидкість. Кінцеві фрези із гвинтовими зубцями забезпечують кращу якість обробки.

Кінцеві фрези призначені для обробки не тільки прямолінійних та криволінійних поверхонь, а ще і для обробки отворів. Метод кінцевого фрезерування дозволяє фрезерувати та розфрезерувати отвори.

Фрезерування отворів є альтернативою іншим методам обробки творів: свердлінню, точінню. Особливістю є траєкторія руху інструменту при фрезеруванні отворів, адже, кінцева фреза рухається за методом гвинтової інтерполяції при цьому, ще і обертаючись навколо власної осі.

Гвинтова інтерполяція – це одночасний рух різального інструменту по трьом осям (X, Y, Z) за певною траєкторією.

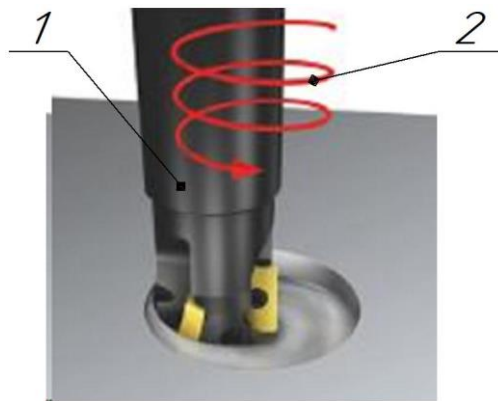


Рис. 1.10. Фрезерування отвору:

1 – кінцева фреза; 2 – траєкторія руху фрези (гвинтова інтерполяція)

Альтернативою розточуванню або розсвердлюванню отворів є розфрезерування, яке може виконуватись двома різними методами (рис. 1.11):

- метод кругової інтерполяції;
- методом гвинтової інтерполяції.

При методі кругової інтерполяції різання виконується по двох осях (X та Y), подача по осі Z – врізання, відбувається поступово на задану глибину після кожного проходу фрези по траєкторії кола.

Обробка отворів кінцевими фрезами виконується методом попутного фрезерування.



Рис. 1.11. Розфрезерування отвору:

а – метод кругової інтерполяції; б – метод гвинтової інтерполяції

Обробка отворів фрезеруванням має такі переваги:

- одним інструментом можна оброблювати певний діапазон діаметрів, не відміну від свердління;
- кінцеві фрези, можна застосовувати для обробки плоских поверхонь деталі із отворами, тим самим зменшуючи кількість різальних інструментів задіяних при обробці;
- висока точність та якість обробленої поверхні.

1.2. Постановка задач дослідження

В роботі необхідно виконати аналіз процесу обробки отворів фрезеруванням. Дослідити траєкторію руху інструменту під час обробки отворів та виконати аналіз впливу режимів різання та сил різання на точність і якість обробки. Виконати пошук та аналіз особливостей конструкції різального інструменту для фрезерування отворів. Розглянути процес стружкоутворення при фрезерній обробці отворів.

Проаналізувати базовий технологічний процес виготовлення корпусу, виявити його переваги та недоліки, розробити прогресивний технологічний процес із застосуванням фрезерування та розфрезерування, вибрати металорізальні верстати, затискні, допоміжні та вимірювальні пристрої, різальні інструменти, розрахувати припуски, режими різання та норми часу. Виконати економічні розрахунки.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФРЕЗЕРУВАННЯ

2.1. Особливості та характеристики фрезерування отворів

Традиційним методом отримання отворів шляхом механообробки є свердління. Однак, отримання отворів фрезеруванням теж є актуальним, особливо, при необхідності отримання глухих отворів з плоским дном. Свердління отвору передбачає вибір свердла, діаметр якого співпадає із діаметром отримуваного отвору. Таким чином, під час механічної обробки деталі, при необхідності свердління декількох отворів різного діаметру, потрібно забезпечити встановлення на верстаті декількох сверدل відповідних діаметрів.

Однак, фрезерна обробка отворів характеризується застосуванням однієї фрези для обробки отворів в межах певного діапазону діаметрів.

При виборі діаметру фрези існують певні правила. Фреза повинна забезпечувати зрізання металу в зоні осьової лінії оброблюваного отвору. Якщо вибрати фрезу занадто малого діаметру, в центрі оброблюваного отвору залишиться стрижень (рис. 2.1, а). Що з точки зору обробки є нетехнологічним, оскільки, стрижень необхідно підтримувати. Він може впасти та пошкодити інструмент або оброблювану поверхню отвору. До того ж, у випадку фрезерування глухого отвору, необхідно вирішувати питання видалення стрижня та зачистки дна отвору.

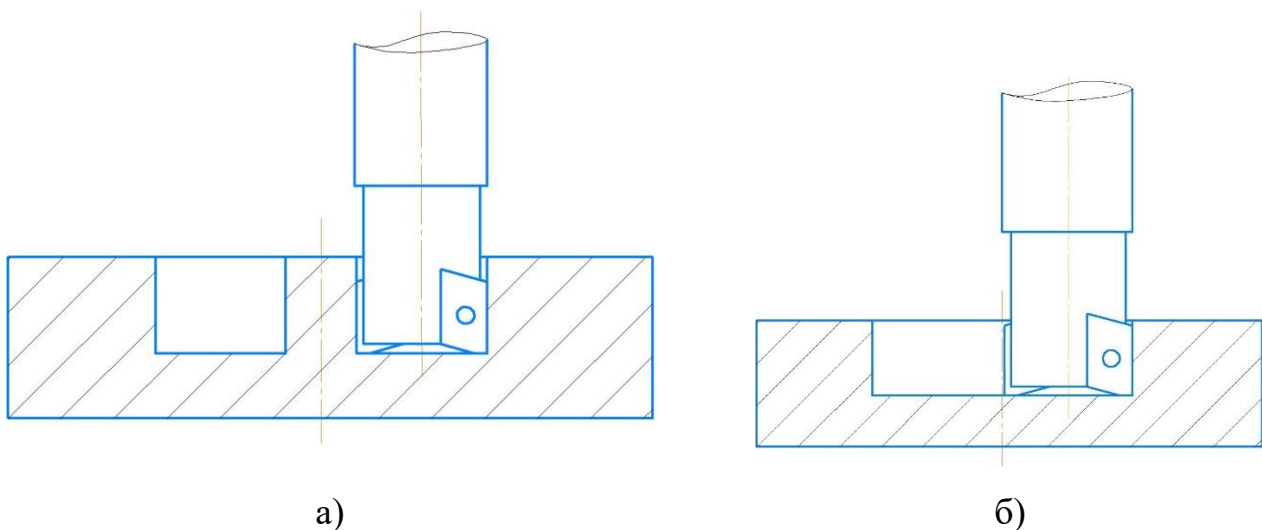


Рис. 2.1. Фрезерування отворів:

а – утворення стрижня; б – без стрижня

Тому, мінімальний діаметр інструменту D_{Φ} повинен дорівнювати половині діаметру отвору D_0 (рис. 2.1, б). Але навіть в такому випадку існує деяка вірогідність утворення на дні отвору бобишки – незрізаного шару металу в центрі отвору (рис. 2.2).

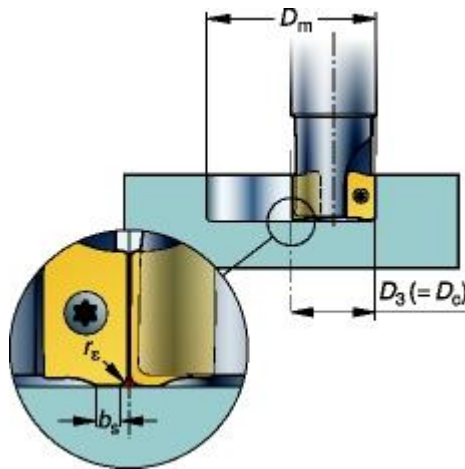


Рис. 2.2. Бобишка

Максимальний діаметр отвору, який можна отримати при фрезеруванні кінцевою фрезою діаметром D_{Φ} визначається за формулою:

$$D_0 = D_{\Phi} \cdot 2$$

Мінімальний діаметр фрези визначається за формулою:

$$D_{\Phi} = \frac{D_0}{2}$$

Наявність бобишки залежить від радіуса при вершині різальної пластини фрези. Фреза виконує рух гвинтової інтерполяції, а при досягненні заданої глибини глухого отвору, необхідно запрограмувати її переміщення до центру отвору. Переміщення фрези забезпечить обробку дна отвору шляхом зрізання бобишки.

2.2. Особливості та характеристики розфрезерування отворів

В механообробці для збільшення діаметру уже існуючого отвору, як правило застосовують операції розсвердлювання, розточування або розфрезерування.

Розфрезерування отвору методом гвинтової інтерполяції передбачає одночасне переміщення фрези по круговій траєкторії (координати X та Y) разом із осьовою

подачею з певним кроком по осі Z. Переміщуючись по траєкторії гвинтової інтерполяції, фреза здійснює одночасне обертається навколо власної осі.

Видалення стружки із зони різання є важливим фактором. При обробці отворів видалення стружки утруднене через обмеженість зони обробки. В конструкціях свердла та цільної кінцевої фрези (рис. 1.9, а) передбачені гвинтові канавки через які стружка виводиться із зони обробки. При розфрезеруванні наскрізного отвору немає проблеми утворення бобишки, тому діаметр фрези може варіюватись в ширших межах. Головна умова при виборі діаметру фрези D_f – забезпечення достатнього простору для належного видалення стружки із зони обробки.

При розсвердлюванні отвору може виникнути необхідність застосування декількох свердл різних діаметрів для поступового зняття припуску та досягнення необхідного діаметру. В такому разі збільшиться час обробки даного отвору та номенклатура задіяного різального інструменту. Застосувавши розфрезерування замість розсвердлювання, економиться час на обробку та застосовується всього один інструмент замість декількох – кінцева фреза.

Розфрезерування методом кругової інтерполяції характеризується врізанням на певну глибину, яка є постійною вздовж осі отвору. Виконавши врізання, фреза, обертаючись навколо власної осі, виконує рух по траєкторії кругової інтерполяції. Кожен наступний прохід фрези починається із врізання на певну глибину (рис. 2.3). Даний метод є менш точним за метод гвинтової інтерполяції, на поверхні отвору залишаються сліди (риски) від кожного проходу фрези.

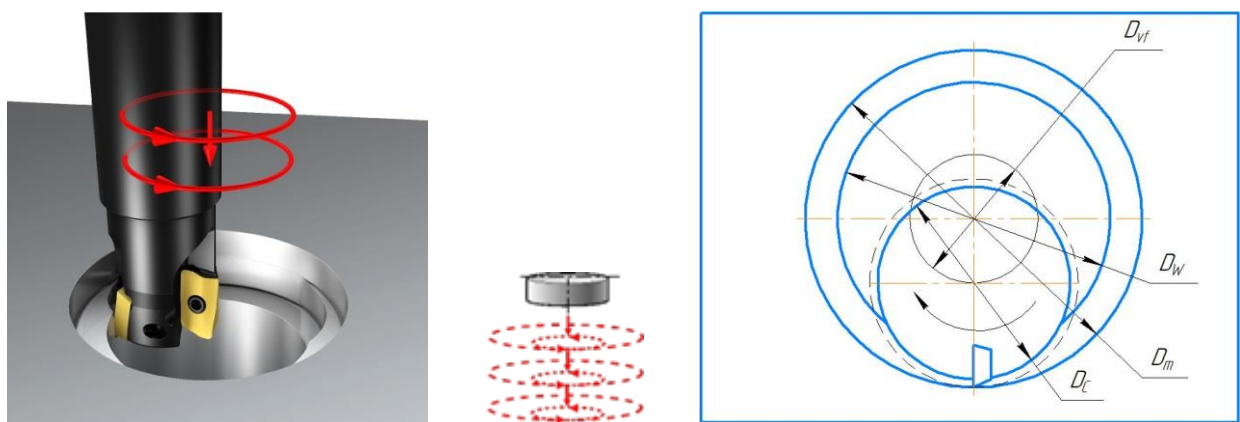


Рис. 2.3. Розфрезерування отвору методом кругової інтерполяції

Фреза описує коло в площині XY. Траєкторія руху центру фрези - D_{vf} (рис. 2.3).

Діаметр кола, яке описує вісь фрези:

$$D_{vf} = D_m - D_c,$$

де D_m – діаметр розфрезерованого отвору;

D_c – діаметр фрези.

Метод гвинтової інтерполяції забезпечує постійне врізання по спіралі (рис. 2.4) та співвісність та круглість отвору.

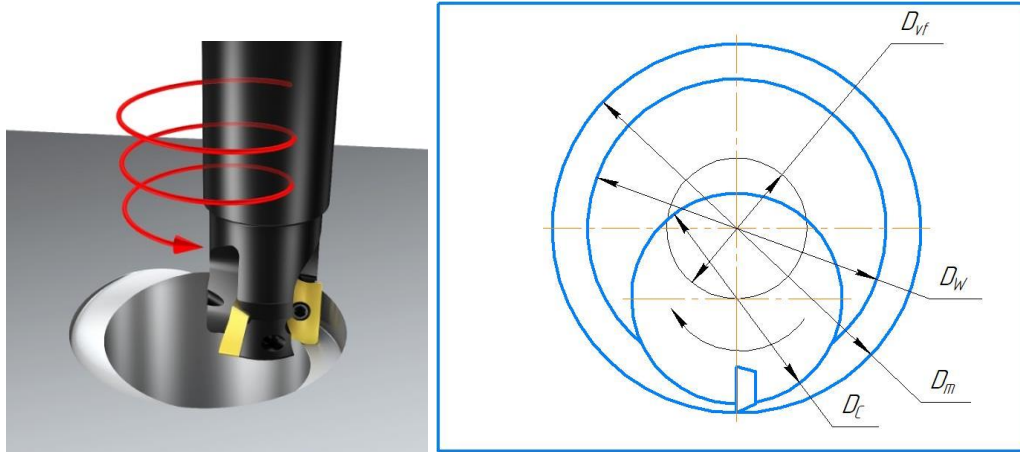


Рис. 2.4. Розфрезеровування отвору методом гвинтової інтерполяції

Під час різання, кінцева фреза зрізає шар металу, як різальними кромками розташованими на периферії, так і кромками на торці.

При фрезерній обробці отворів відбувається одночасне зрізання металу в двох взаємно перпендикулярних площинах. Головні різальні кромки периферії фрези формують внутрішню циліндричну поверхню, а допоміжні різальні кромки, що розташовані по торцю фрези, утворюють довжину (глибину) отвору. Схему зрізаємого одним зубом фрези припуску показано на рисунку 2.5.

Головна різальна кромка при врізанні виконує зустрічне фрезерування із переходом у попутне (поз. 1 рис. 2.5). Максимальна товщина зрізаємого шару f_{zt} . Торець фрези знімає шар металу товщиною f_{za} .

Зі збільшенням діаметра фрези збільшується розмір шару, який зрізається периферією інструмента (поз. 1 рис. 2.5), що призводить до вібрації, а, отже, до погіршення якості поверхні.

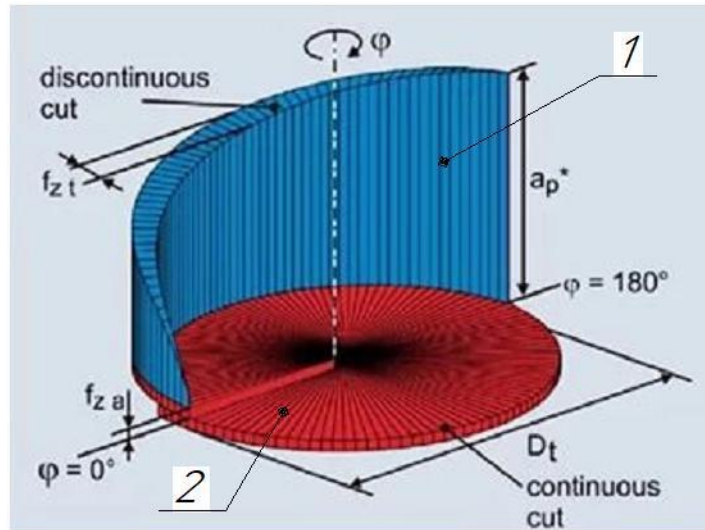


Рис. 2.5. Схема зрізаємого шару припуску при фрезеруванні отвору:

1 – зрізається різальною кромкою периферії фрези; 2 – зрізається торцевою кромкою

Зі збільшенням об'єму матеріалу, видаляемого периферією фрези, зростають радіальні сили різання F_r (рис. 2.6), які намагаються відтиснути інструмент, що призводить до зняття меншого припуску та до зменшення допуску.

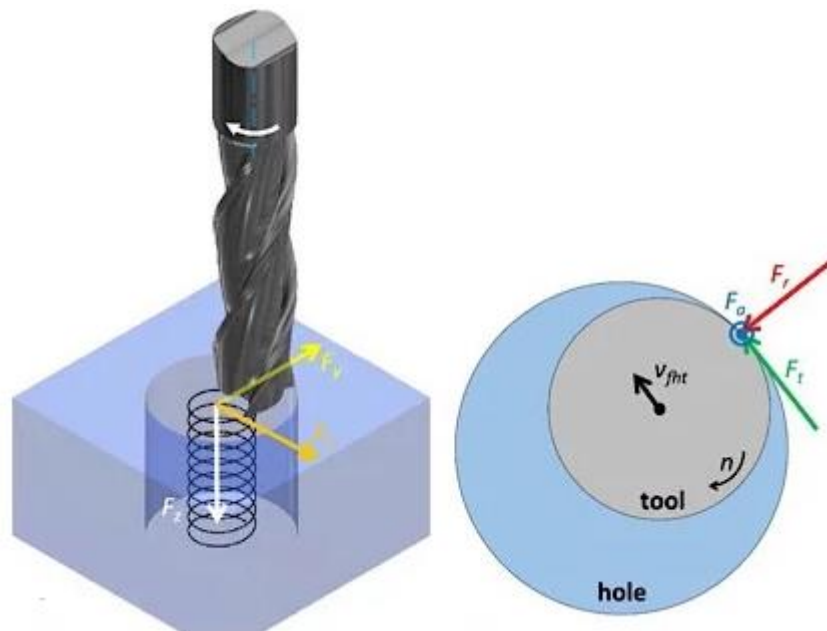


Рис. 2.6. Схема дії сил різання при розфрезеровуванні отвору

Завдяки тому, що фрези більшого діаметру мають більшу жорсткість, негативний ефект радіальної сили різання певною мірою зменшується.

При менших діаметрах фрез, радіальна сила та вібрація невелика. Однак, при цьому, повинна забезпечуватись жорсткість системи.

В дослідженні [9] порівняно величину осьових сил, які виникають при свердлінні та фрезеруванні титанового сплаву Ti6Al4V. Виконували обробку отворів діаметром 6 мм та довжиною 10 мм свердлом діаметром 6 мм та кінцевою фрезою діаметром 5 мм. Швидкість різання варіювалася в межах 20-80 м/хв, осьова подача при свердлінні – 0,015-0,045 мм/зуб, осьова подача при фрезеруванні – 0,2-0,5 мм/зуб.

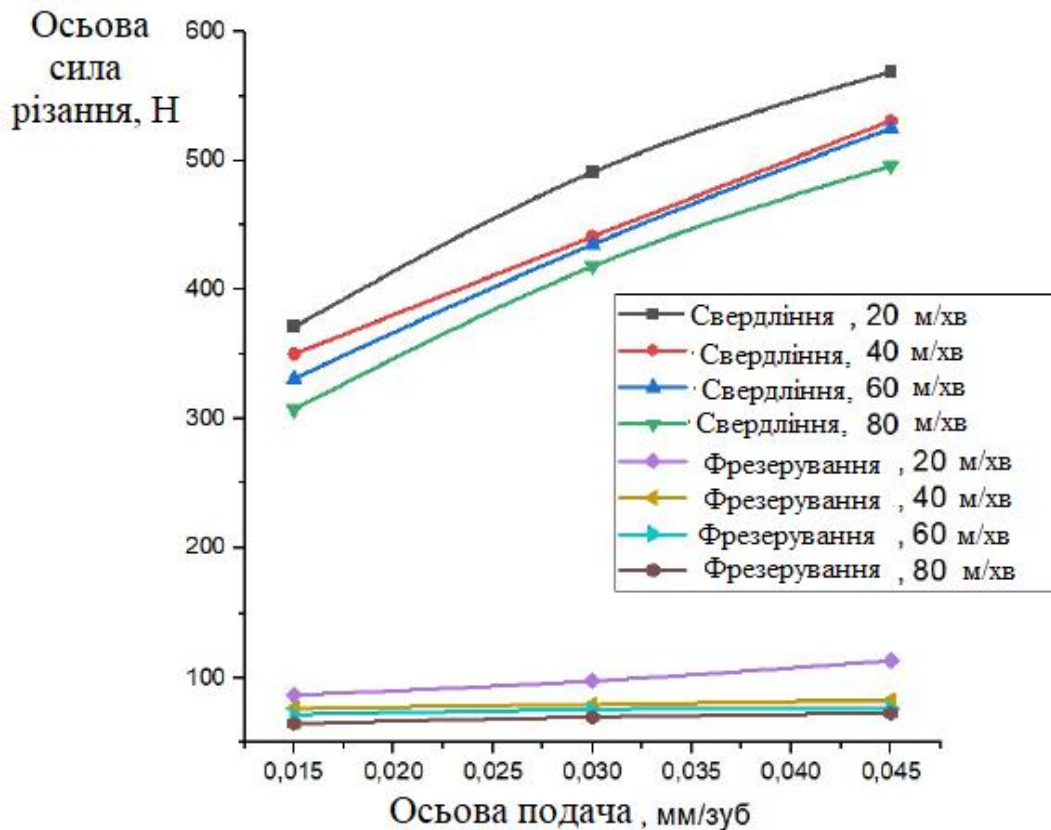


Рис. 2.7. Графік осьової сили при свердлінні та фрезеруванні отворів

Результати (рис. 2.7) дослідження [9] показали, осьова сила в декілька разів вища при свердлінні ніж при фрезеруванні отворів. Кінцева фреза виконує різання торцем та периферією, що обумовлює більш рівномірне розподілення різального навантаження та нижчі значення осьової сили, порівняно зі свердлінням.

Спільним для обох варіантів обробки отвору є те, що:

- осьова сила знижується зі збільшенням швидкості різання;
- осьова сила зростає зі збільшенням значень осьової подачі через збільшення товщини зрізаємої стружки.

2.3. Режими різання при розфрезеруванні отворів

Кінематика свердління отвору та фрезерної обробки отвору має суттєві відмінності. При свердлінні, діаметр отвору визначається діаметром свердла. При обробці отвору фрезеруванням, його діаметр визначається поєднанням діаметрів фрези та гвинтової траєкторії переміщення різального інструменту. Для розуміння процесу розфрезерування отвору методом гвинтової інтерполяції представлено його кінематичну схему (рис. 2.8).

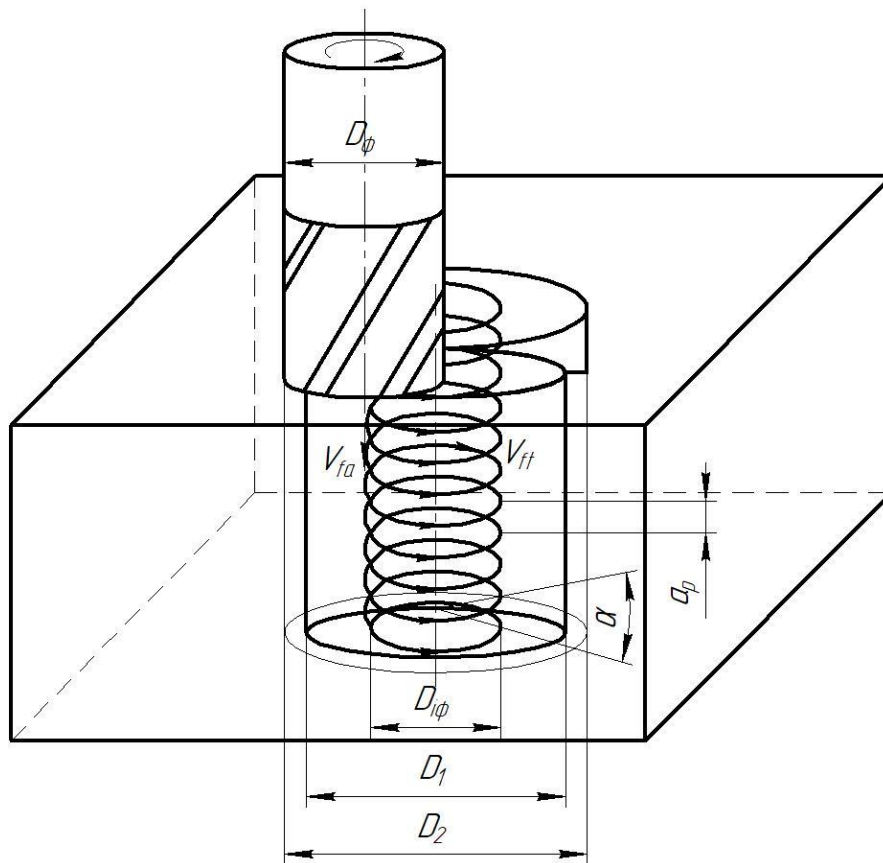


Рис. 2.8. Кінематика розфрезерування отвору

До параметрів розфрезерування отворів належать: D_1 – діаметр отвору до обробки; D_2 – діаметр отвору після обробки; V – швидкість різання; D_ϕ – діаметр фрези; $D_{i\phi}$ – діаметр гвинтової інтерполяції, тобто траєкторії переміщення центру фрези; a_p – крок інтерполяції; V_f – швидкість подачі.

Основні параметри, які визначають стратегію гвинтової інтерполяції:

- подача;
- крок;

- діаметр фрези.

При розфрезеруванні інструмент працює своєю периферією. Швидкість подачі в центрі фрези V_f та на периферії, де розташовані різальні кромки, різна. Тому, найбільш важливим фактором при фрезеруванні периферією є визначення подачі на зуб f_z .

Подача на зуб f_z визначається за формулою:

$$f_z = \frac{h_{ex}}{\sin \beta}$$

де h_{ex} – товщина зрізаного шару (рис. 2.8).

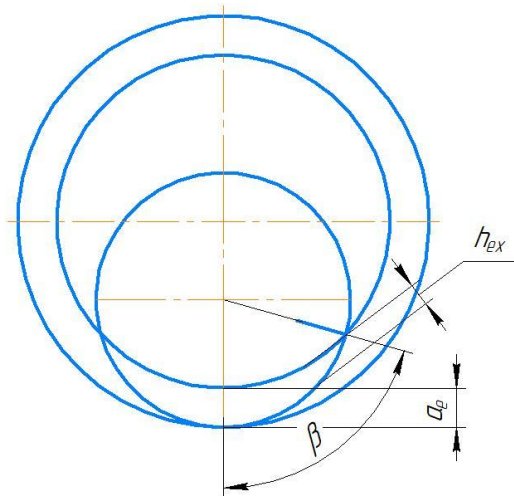


Рис. 2.9. Схема врізання

Швидкість подачі в центральній точці фрези V_f визначається за формулою:

$$V_f = \sqrt{V_{fha}^2 + V_{fht}^2},$$

де V_{fha} – осьова подача на зуб:

$$V_{fha} = f_{za} \cdot z \cdot n,$$

де f_{za} – осьова подача на зуб,

z – кількість зубців фрези,

n – частота;

V_{fht} – радіальна подача гвинтової інтерполяції:

$$V_{fht} = V_{ft} \cdot \frac{D_{i\phi}}{D_2}$$

де V_{ft} – радіальна подача на зуб:

$$V_{ft} = f_{zt} \cdot z \cdot n.$$

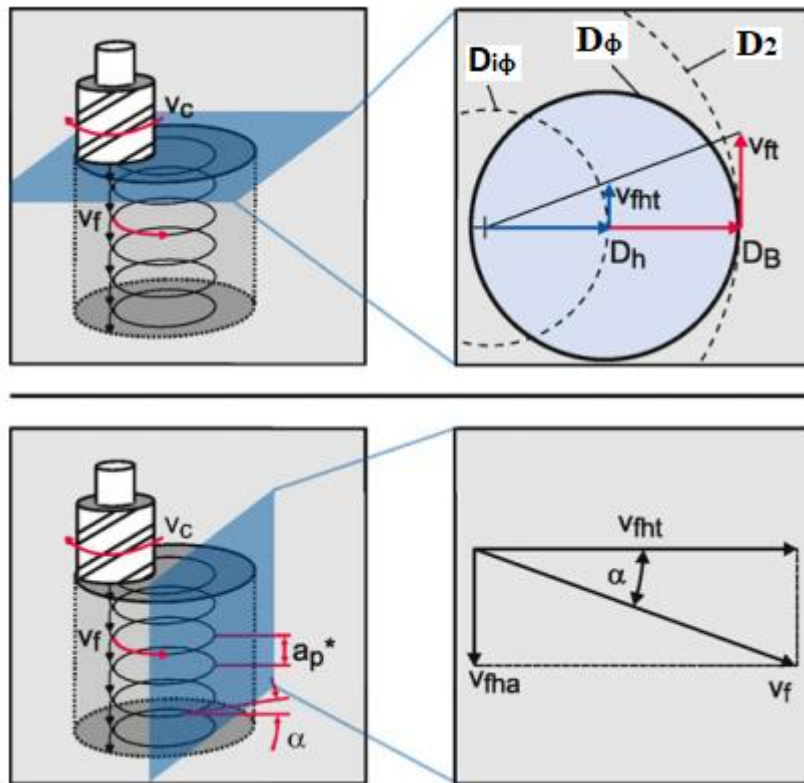
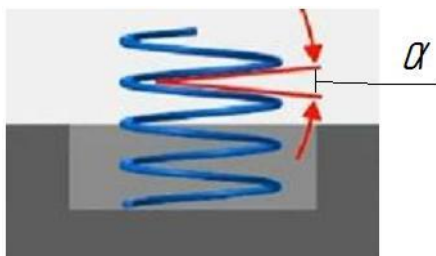


Рис. 2.10. Схема параметрів гвинтової інтерполяції

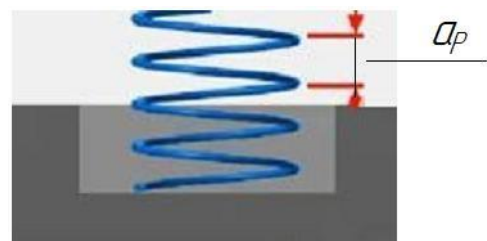
Другим важливим параметром гвинтової інтерполяції є крок спіралі a_p (рис. 2.10) – це відстань по осі Z, на яку заглиблюється фреза в отвір за один оберт інтерполяції по дузі в координатах X та Y.

Відстань заглиблення фрези по осі Z за один оберт можна задавати одним із двох параметрів (рис. 2.11):

- кутом гвинтової інтерполяції α ;
- кроком a_p .



а)



б)

Рис. 2.11. Варіанти задання глибини врізання:

а – кут; б – крок

Кут гвинтової інтерполяції визначається за формулою [13]:

$$\alpha = \arctan \frac{f_{za}}{f_{zt}}$$

Крок a_p визначається за формулою [13]:

$$a_p = \frac{f_{za} \pi (D_2 - D_\phi)}{f_{zt}}$$

При заданні кроку необхідно керуватись рекомендованим виробником значенням a_p для обраної фрези. В цьому випадку, крок залежить від діаметру отвору, діаметру фрези та кута врізання. Так, наприклад, для трьохзубих кінцевих фрез діаметром 12-16 мм зі змінними пластинами максимальне значення a_p , тобто довжина різальної кромки рівна 5,5 мм (рис. 2.12).

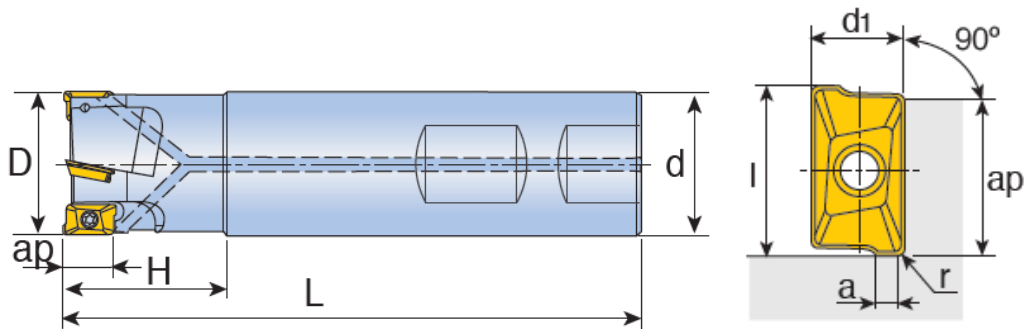


Рис. 2.12. Параметри кінцевої фрези

Перевищення рекомендованого виробником значення a_p призведе до некоректної обробки та до пошкодження інструменту та заготовки.

Проектування інтерполяції шляхом задання кута гвинтової лінії засноване на залежності значення даного кута від матеріалу оброблюваного отвору.

Значення кутів гвинтової лінії інтерполяції:

- при обробці загартованої сталі $\alpha = 1 - 3^\circ$;
- при обробці сталі та чавунів $\alpha = 3 - 5^\circ$;
- при обробці алюмінію $\alpha = 5 - 10^\circ$.

Розглянуто [13] процес фрезерування отвору та досліджено вплив частоти обертання шпинделя, радіальної подачі та кроку на осьову (рис. 2.13) та радіальну (рис. 2.14) сили.

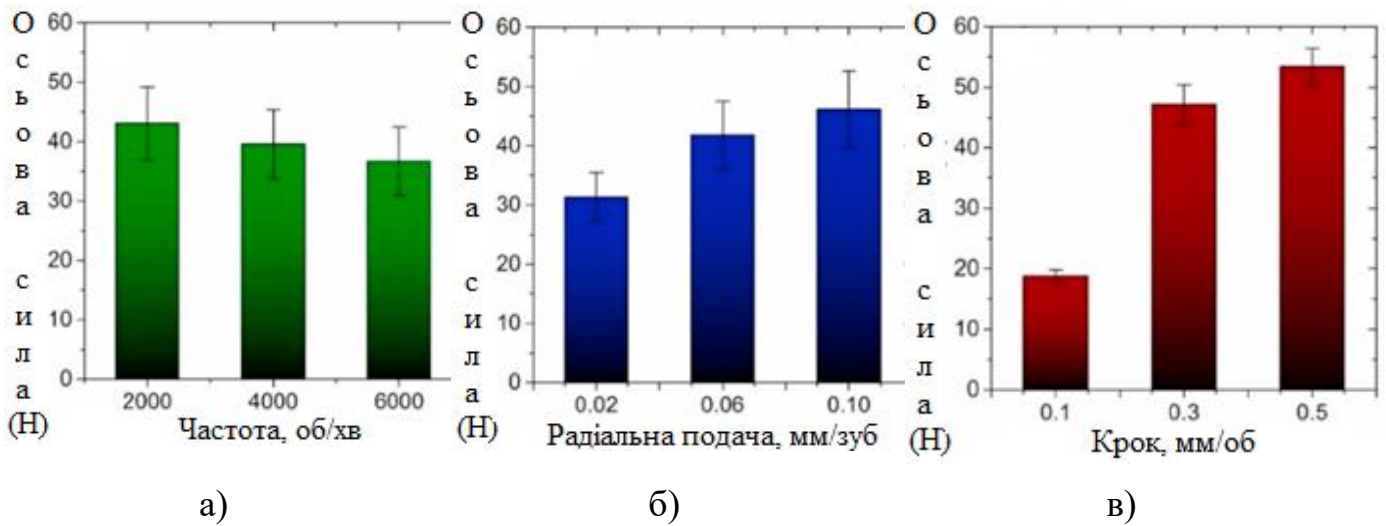


Рис. 2.13. Графіки залежності осьової сили від:

а – частоти обертання шпинделя; б – радіальної подачі; в – кроку

Збільшення частоти обертання шпинделя призводить до зниження осьової сили (рис. 2.13, а) за рахунок підвищення температури різання. Утворене в процесі різання тепло не вивільняється із зони обробки тим самим пом'якшуючи оброблюваний матеріал і полегшуючи зрізання шару металу. Осьова сила зростає при збільшенні радіальної подачі (рис. 2.13, б) та при збільшенні осьового кроку (рис. 2.13, в). Це пояснюється тим, що збільшення радіальної подачі призводить до збільшення товщини стружки, а збільшення кроку призводить до збільшення глибини різання по осі Z (рис. 2.14) тобто, збільшується об'єм видаляемого матеріалу.

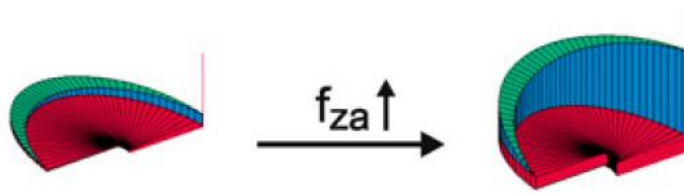


Рис. 2.14. Вплив осьової подачі на форму зрізаемого шару металу

Радіальна подача f_{zt} має протилежний ефект на радіальну силу у порівнянні із осьовою. Збільшення радіальної подачі призводить до зниження радіальної сили (рис. 2.15, б) за рахунок зменшення висоти недеформованої стружки (рис. 2.16).

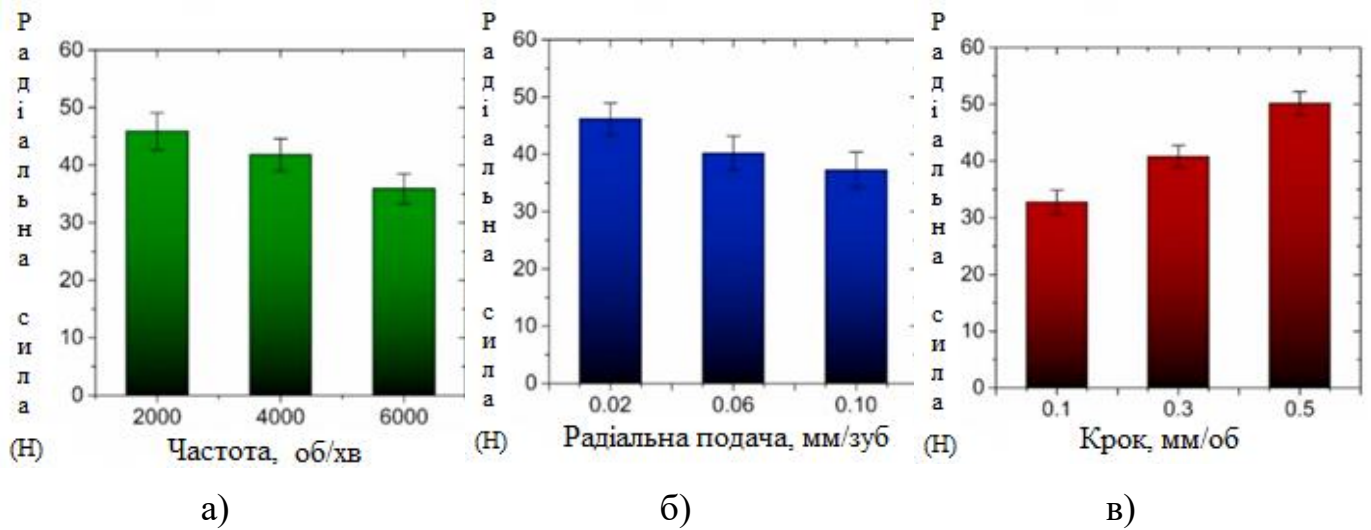


Рис. 2.15. Графіки залежності радіальної сили від:

а – частоти обертання шпинделя; б – радіальної подачі; в – кроку

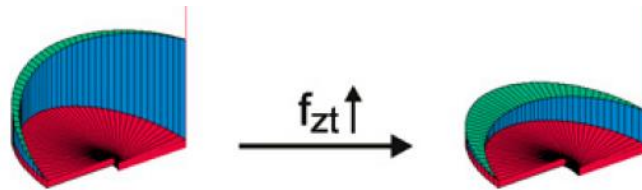


Рис. 2.16. Вплив радіальної подачі на форму зрізаного шару металу

2.4. Геометричні параметри фрез

При виборі кінцевої фрези необхідно звернути увагу на такі її параметри (рис. 2.17):

- діаметр D ;
- довжину робочої частини ap ;
- радіус закруглення різальної кромки r ;
- кут спіралі γ ;
- кількість зубців z .

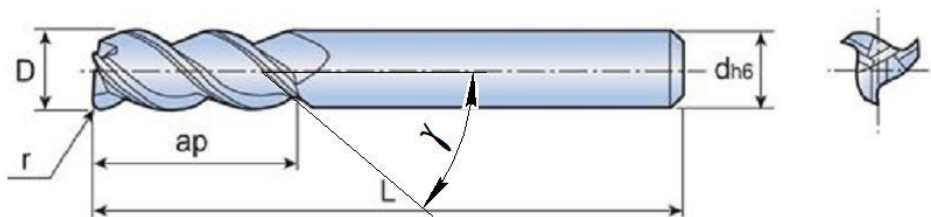


Рис. 2.17. Параметри кінцевої фрези

Діаметр фрези залежить від діаметру отвору, який отримується після розфрезерування. При цьому, фреза не повинна бути занадто великого діаметру, повинно залишатись достатньо місця для видалення стружки із зони обробки. При фрезеруванні отвору інструментом занадто малого діаметру, може спостерігатись недостатня жорсткість, що призведе до недотримання точності та якості обробленої поверхні. Для уникнення проблем із видаленням стружки та забезпечення утворення запрограмованої дуги інтерполяції, мінімальний діаметр отвору, який можна обробити фрезою, рекомендовано розраховувати шляхом збільшення діаметра фрези на 20-40%. Наприклад, фреза діаметром 14 мм придатна до розфрезерування отворів діаметром від 18 мм.

Радіус закруглення r допомагає рівномірно розподілити сили різання між торцевою та периферійною різальними кромками та додає міцності кромкам. Існують кінцеві фрези, в яких радіус закруглення відсутній. Кут між торцевою та периферійною кромками у таких фрез рівний 90° . Для фрезерування та розфрезерування отворів рекомендовано застосовувати кінцеві фрези із радіусом закруглення r .

Кут спіралі γ визначає розташування різальних кромок на периферії фрези. Від величини γ залежить якість обробленої поверхні. При меншому куті спіралі процес різання проходить швидше, що забезпечує менше нагрівання в зоні обробки. Фрези із більшим кутом спіралі забезпечують кращу якість поверхні (до H6). Для чорнового фрезерування отворів рекомендується застосовувати кінцеві фрези із кутом спіралі $\gamma = 35^\circ$, а для чистового – $\gamma = 45^\circ$.

Світові виробники різальних інструментів рекомендують застосовувати кінцеві фрези із такою кількістю зубців z залежно від оброблюваного матеріалу:

- для загартованої сталі $z = 6 \dots 7$;
- для сталі $z = 4 \dots 5$;
- для алюмінію $z = 2 \dots 3$.

Фреза із $z = 3$ для обробки алюмінію забезпечує баланс міцності та величини зазору для стружки. Якщо для обробки алюмінію необхідно застосувати довгий інструмент, який, через свою довжину, схильний до вібрації, також у випадку

забезпечення нижчих сил різання або при умові забезпечення більшого зазору для видалення стружки, рекомендується виконувати обробку кінцевими фрезами із двома зубцями.

Не менш важливим є правильний вибір матеріалу фрези. Будь-який матеріал характеризується в'язкістю та твердістю. Обробку алюмінієвих деталей виконують інструментом із твердого сплаву.

До складу твердого сплаву входить карбід вольфраму (WC) та кобальт (Co). Карбід вольфраму (вміст у сплаві 80-98%) забезпечує тверду фазу, від розміру його зерен залежать характеристики сплаву: крупні розміри зерен надають більшій твердості, а дрібніші – міцності (рис. 2.18). Для збереження гостроти кромки необхідно обирати тверді сплави із дрібнішими зернами карбіду вольфраму.

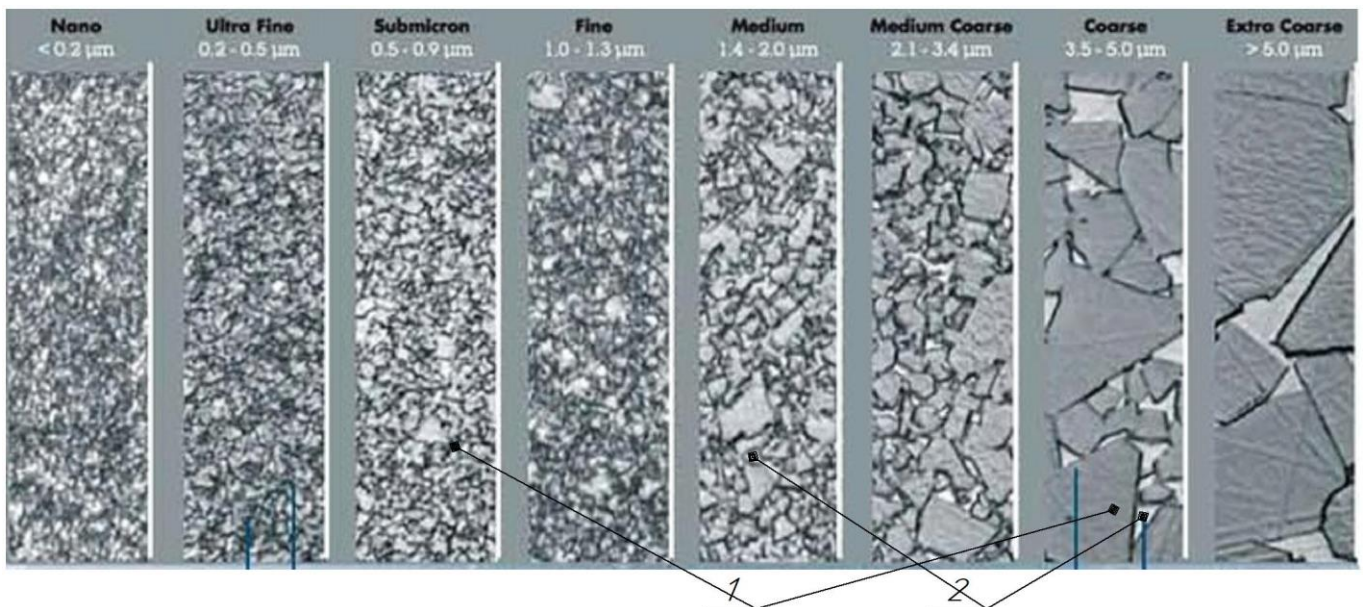


Рис. 2.18. Мікроструктура твердих сплавів

В твердому сплаві кобальт виступає у ролі зв'язки, а його вміст у сплаві сягає 2-20%. Жорсткість інструменту зростає зі збільшенням вмісту кобальту у сплаві, через більшу м'якість кобальту в порівнянні із карбідом вольфраму. При зменшенні вмісту кобальту – зростає твердість інструменту.

Для фрезерування отворів в деталях із алюмінію застосовують кінцеві фрези з таких марок твердого сплаву: BK3, BK6, BK8, UF10, UF10N, K10 та ін. Вони характеризуються високою зносостійкістю, міцністю, стійкістю до деформації.

Для покращення характеристик обробки можна застосовувати твердосплавні фрези з покриттям. При обробці алюмінію доцільно застосовувати покриття з нітриду цирконію (ZrN) або керамічне покриття диборію титану (TiB₂). Нітрид цирконію підвищує зносостійкість інструменту, має низький коефіцієнт тертя, що знижує температуру обробки. Керамічне покриття диборію титану має малу схожість із алюмінієм, тому не відбувається налипання стружки до фрези. Дане керамічне покриття застосовується лише для чорнової обробки.

2.5. Точність обробки при розфрезеруванні

Фрезерування та розфрезерування отворів відноситься до чистових методів обробки та дозволяє досягти 6-8 квалітету точності. Проведено дослідження забезпечення Н9 квалітету при свердлінні та фрезеруванні отворів $\varnothing 6,8^{+0,036}$ мм та порівняно [10] отримані результати.

Отвори діаметром 6,8 мм просвердлено інструментом аналогічного діаметру, а фрезерування виконано кінцевою фрезою діаметром 5 мм. Вимірювання діаметрів отворів оброблених обома методами виконувалось в двох перерізах – діаметр на вході інструменту та діаметр в кінцевій точці обробки. Результати досліджень представлено на рисунку 2.19.

Проаналізувавши результати вимірювань, можна зробити наступні висновки:

- за рахунок розподілу навантаження різання між торцевими та периферійними кромками фрези, осьова сила при фрезеруванні нижча у порівнянні із процесом свердління, що впливає на точність отримуваних розмірів;
- діаметри отворів в кінцевій точці обробки мають менше поле допуску при обох розглядаємих методах обробки;
- при свердлінні допуск на діаметр в початковій точці обробки був перевищений;
- фрезерування забезпечило розміри в межах заданого допуску, як в початковій, так і в кінцевій точці обробки;
- збільшення швидкості різання в межах досліджуваних 45-85 м/хв призвело до утворення отворів, поля допусків діаметрів яких зменшувались та прагнули до

номінальних розмірів. Така тенденція спостерігалась, як при свердлінні, так і при фрезеруванні;

- збільшення осьової подачі при свердлінні забезпечує зменшення допуску на розмір, а при фрезеруванні – збільшення.

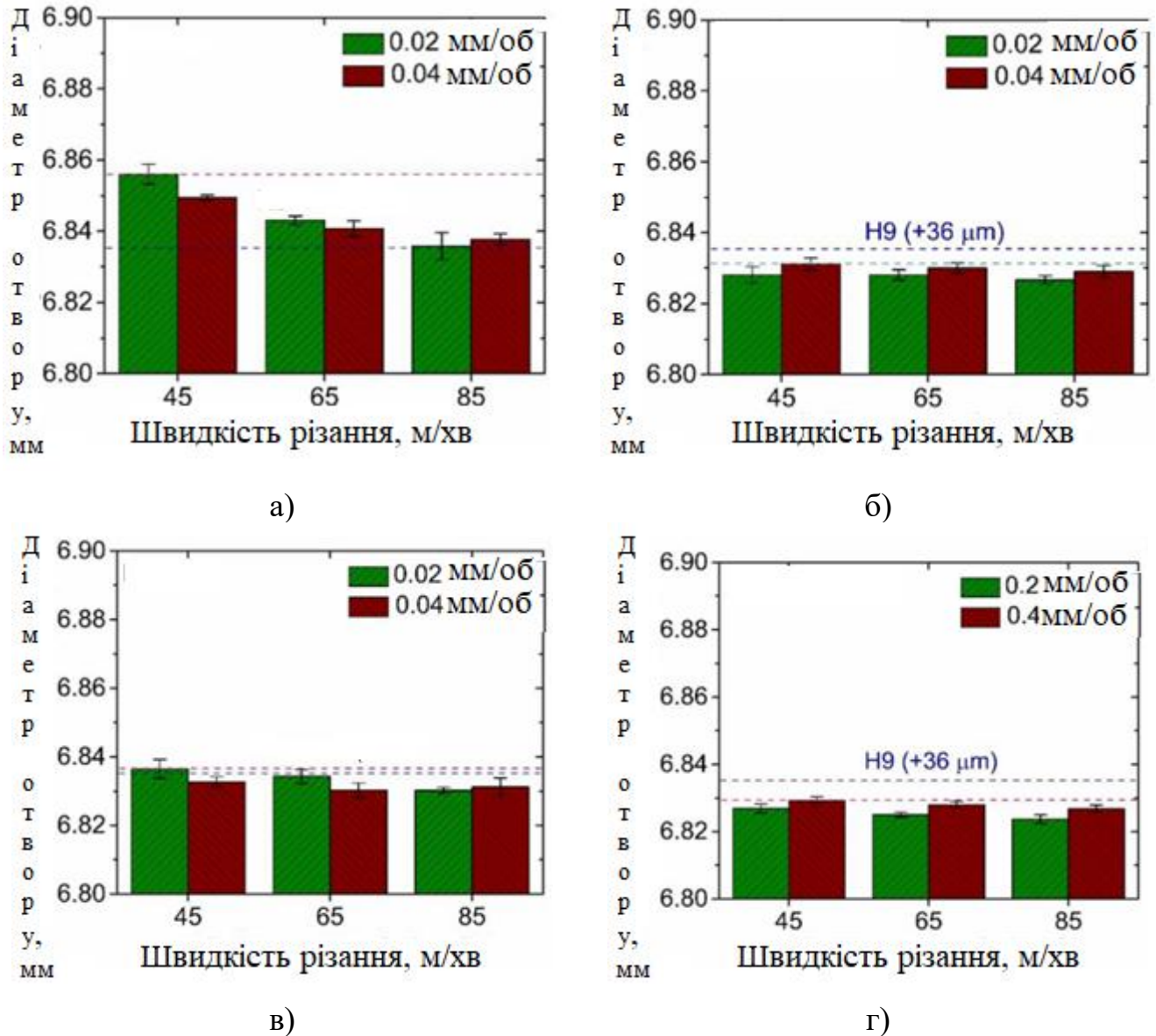


Рис. 2.19. Порівняння діаметрів отворів:

а – на початку обробки свердлінням; б – на початку обробки фрезеруванням; в – в кінцевій точці отвору при свердлінні; г – в кінцевій точці отвору при фрезеруванні

Встановлено [10], що в результаті свердління наскрізних отворів на нижній торцевій площині, під час виходу свердла на задану довжину обробки та його перебігу на необхідне значення, утворюються задирки (рис. 2.20, а). Наявність задирок погіршує якість поверхні деталі та може вплинути на її робочі характеристики у

складальній одиниці. Тому, для усунення задирок необхідно вводити додаткові операції такі, як зачисну або обдирну в технологічний процес обробки деталі, що призводить до зниження продуктивності та підвищення собівартості виготовлення.

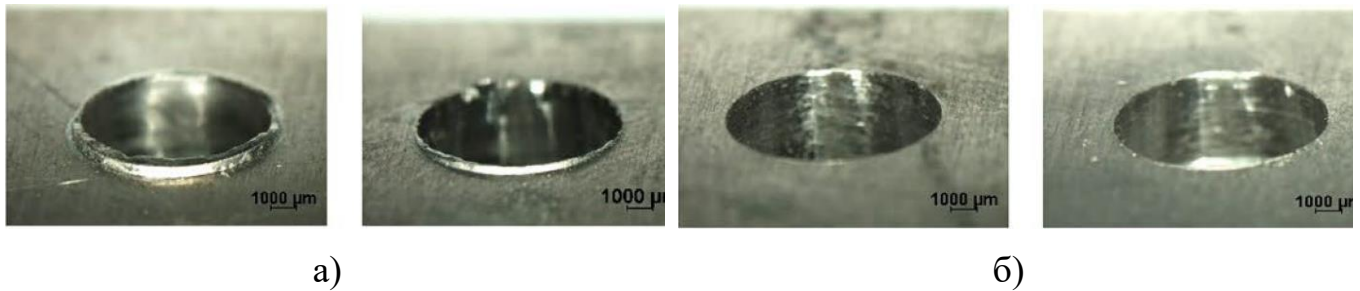


Рис. 2.20. Утворення задирок в кінцевій точці обробки при:
а – свердлінні; б – фрезеруванні

В той самий час, отвори оброблені фрезеруванням демонструють відсутність або прагнуть до відсутності задирок (рис. 2.20, б). Причинами утворення задирок при свердлінні є: більші значення осьової сили у порівнянні із фрезерною обробкою, температура в зоні обробки, деформація шару металу. Механізм деформації можна описати так: в зоні виходу різальної кромки свердла та утворення наскрізного отвору, відбувається пластична деформація та розтягування шару металу, який і перетворюється у задирку.

При фрезеруванні отвору осьова сила є меншою. Кінцеві фрези забезпечують зрізання пластично деформованого шару металу периферійними різальними кромками, що суттєво зменшує або усуває задирки.

2.6. Стружкоутворення та шорсткість при розфрезеруванні отворів

При фрезерній обробці отворів відбувається одночасне зрізання металу в двох взаємно перпендикулярних площинах.

В роботі [12] розглянуто форму стружки та досліджено процес її утворення та вплив подачі на цей процес. Стружка, що зрізається торцевими та периферійними кромками має різну форму (рис. 2.21). Різальні кромки, розташовані на торцевій частині фрези виконують безперервне різання, а периферійні різальні кромки – переривчасте, кожен зуб фрези зрізає шар металу в радіальному напрямку.

Стружка, що отримується при різанні торцевими різальними кромками (рис. 2.21, а) має більш цілну форму на відміну від стружки (рис. 2.21, б), сформованої при різанні периферійними різальними кромками. Така стружка легко видаляється через зазор між фрезою та оброблюваним отвором та через канавки інструменту.

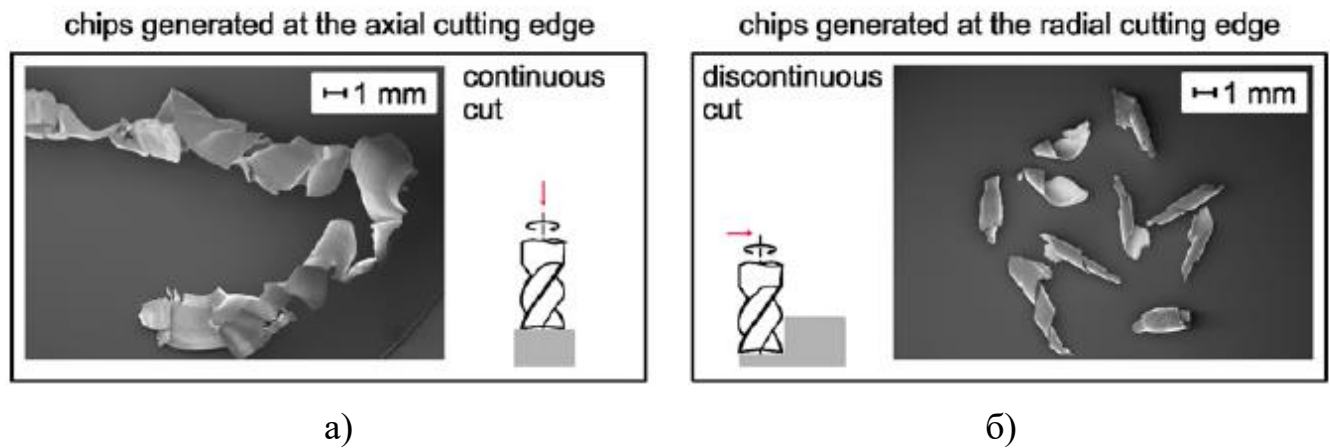


Рис. 2.21. Стружка при розфрезеровуванні отвору:

а – торцевими різальними кромками; б – периферійними різальними кромками

Товщина стружки в осьовому напрямку інструмента, зрізаємої торцевою кромкою рівна осьовій подачі на зуб f_{za} (рис. 2.5). Ширина такої стружки при фрезеруванні отвору буде рівна половині діаметру фрези. При розфрезеровуванні отвору, ширина розглядаємої стружки буде рівна половині різниці діаметрів обробленого отвору та отвору до обробки.

При розфрезеровуванні отвору, периферійна різальна кромка зрізає шар металу, товщина якого має синусоїдальний характер зміни в межах кроку гвинтової інтерполяції a_p та максимальна товщина шару рівна радіальній подачі на зуб f_{zt} (рис. 2.5).

На відміну від фрезерування, при якому відбувається переривчасте різання, свердління характеризується утворенням цілної спіральної стружки (рис. 2.22, а). Із зони обробки стружка виводиться по спіральних стружкових канавках свердла (рис. 2.23). При цьому відбувається тертя стружки по щойнообробленій поверхні отвору. В результаті тертя відбувається погіршення чистоти обробленої поверхні, на ній з'являються мікроподряпини, лунки та т. і.



а)



б)

Рис. 2.22. Стружка, утворена:
а – свердлінням; б – розфрезеруванням

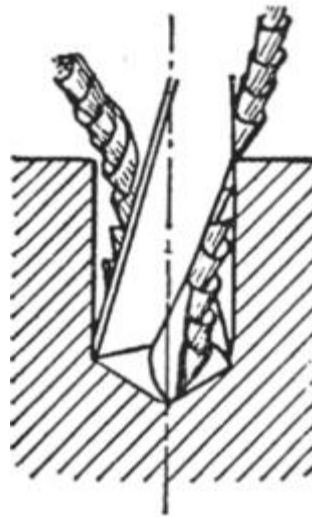
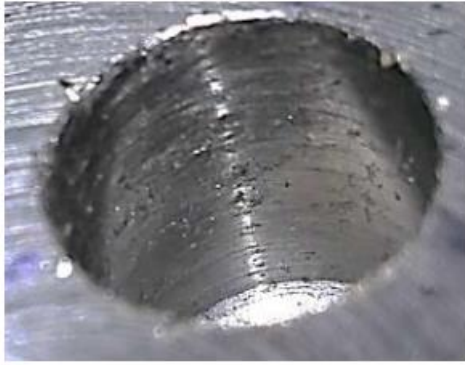


Рис. 2.23. Відведення стружки при свердлінні отвору

Виконано порівняння [9] шорсткості отворів отриманих свердлінням та фрезеруванням (рис. 2.24). При проведенні експериментів, швидкість різання змінювали в таких межах: 1-3 експерименти – швидкість 20 м/хв; 4-6 експерименти – швидкість 40 м/хв; 7-9 експерименти – швидкість 60 м/хв; 10-12 експерименти – швидкість 80 м/хв. Значення подач теж варіювали кожні три експерименти від меншого до більшого.



а)



б)

Рис. 2.24. Якість поверхні отвору отриманого:

а – свердлінням; б – фрезеруванням

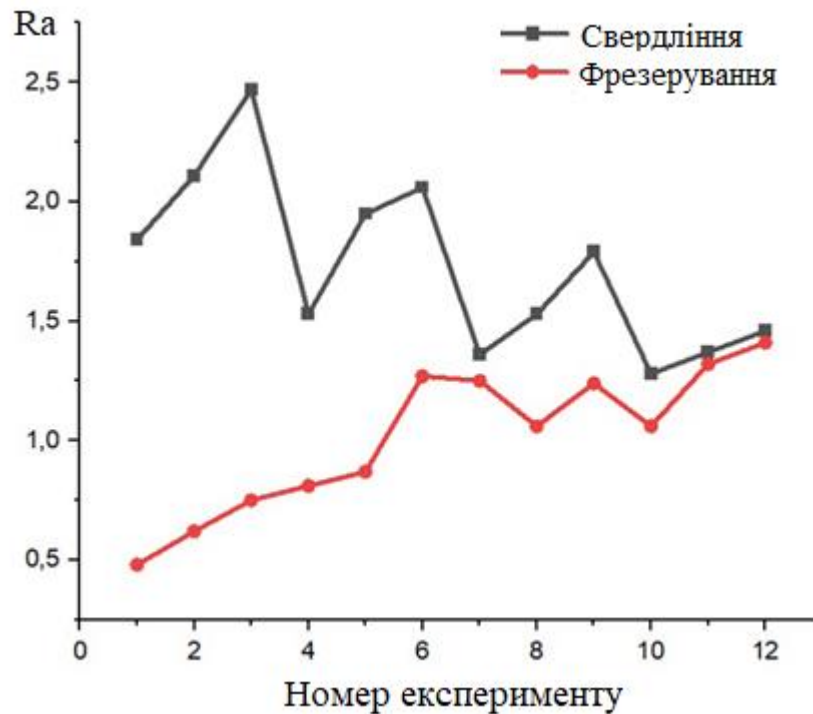


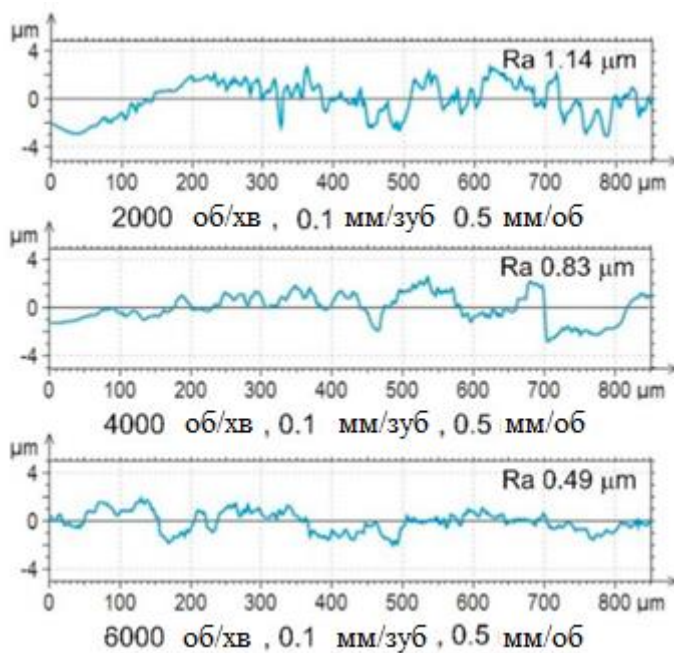
Рис. 2.25. Графік шорсткості отворів при свердлінні та фрезеруванні

З графіка (рис. 2.25) видно, що при однаковій швидкості різання, шорсткість поверхні отвору виготовленого фрезеруванням нижча. Шорсткість отвору при фрезеруванні Ra 0,5-1,4 мкм. Шорсткість поверхні збільшується при збільшенні швидкості різання та подачі.

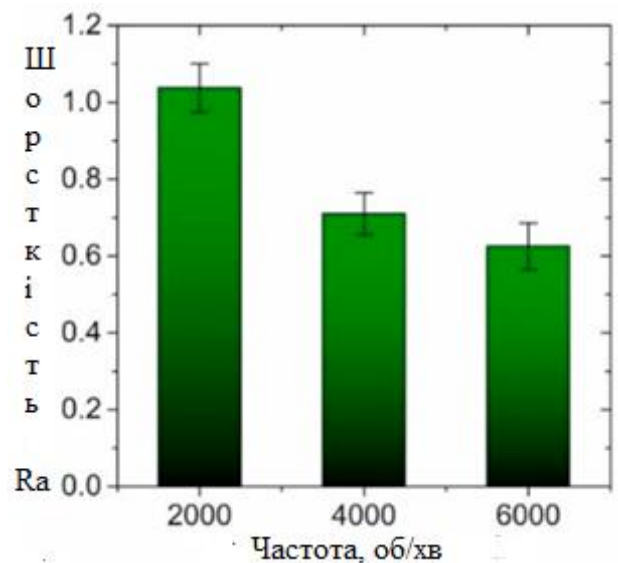
Задання великого значення подачі при фрезеруванні отвору призведе до збільшення кількості незрізаного матеріалу при обробці, що призведе до виникнення слідів від вібрації внаслідок збільшення навантаження на інструмент.

Досліджено [13] вплив зміни частоти обертання шпинделя, радіальної подачі та кроку гвинтової інтерполяції на шорсткість обробленої поверхні. Фрезерування отворів діаметром 10 мм виконувалось у заготовці із магнієвого сплаву кінцевою фрезою діаметром 8 мм. Під час дослідження впливу частоти обертання шпинделя на шорсткість поверхні, постійними параметрами обробки були крок – 0,5 мм/об та радіальна подача – 0,1 мм/зуб. Значення частот обертання шпинделя варіювалось в межах 2000-6000 об/хв.

Профіль шорсткості поверхонь оброблених отворів представлено на рисунку 2.26, а. При частоті обертання шпинделя рівній 2000 об/хв, середня шорсткість становить $Ra\ 0,91\ \mu\text{м}$, а максимальна - $Ra\ 1,14\ \mu\text{м}$. Збільшення частоти до 4000 об/хв дозволило отримати середню шорсткість $Ra\ 0,58$, а максимальну - $Ra\ 0,83\ \mu\text{м}$. При 6000 об/хв середня шорсткість досягла значення $Ra\ 0,49\ \mu\text{м}$, а максимальна - $Ra\ 0,68\ \mu\text{м}$.



а)



б)

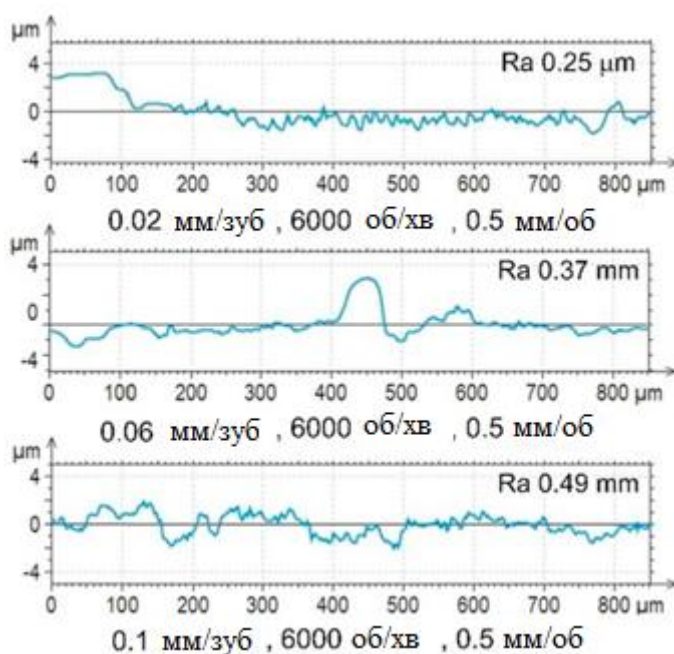
Рис. 2.26. Шорсткості поверхонь отворів:

а - профілограма; б – графік залежності шорсткості від частоти

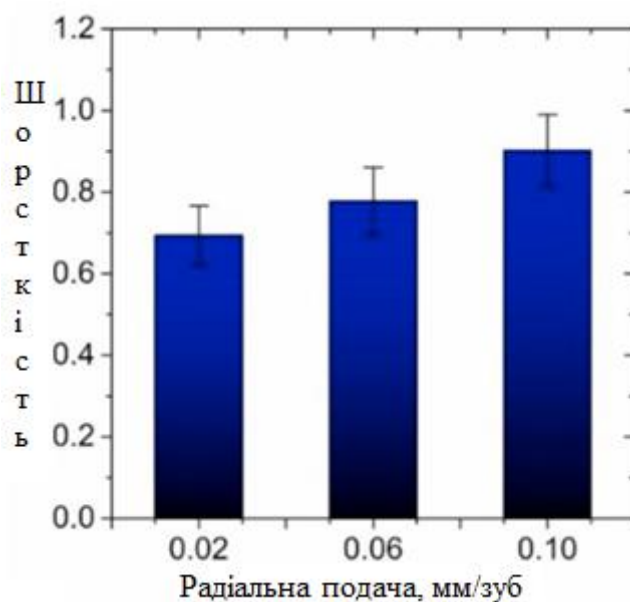
Зазначається, що збільшенням частоти обертання вдалося досягти зниження шорсткості оброблених поверхонь на 36%. Завдяки збільшенню частоти обертання шпинделя знижуються сили різання та зменшується час контакту різальної кромки із

обробленою поверхнею, що запобігає закручуванню стружки та пошкодженню нею обробленої поверхні.

При дослідженні впливу радіальної подачі на шорсткість поверхні, застосовувались такі значення радіальної подачі – 0,02 мм/зуб, 0,06 мм/зуб та 0,1 мм/зуб. Обробку виконували із частотою 6000 об/хв та осьовою подачею (кроком) 0,5 мм/об. Профілограми оброблених поверхонь отворів представлено на рисунку 2.27, а. Для досліджуваного діапазону подач шорсткість знаходиться в межах Ra 0,56-0,77 мкм. Шорсткість збільшується зі збільшенням радіальної подачі. Збільшення подачі призводить до збільшення товщини стружки і, як наслідок, до зростання сил фрезерування.



а)

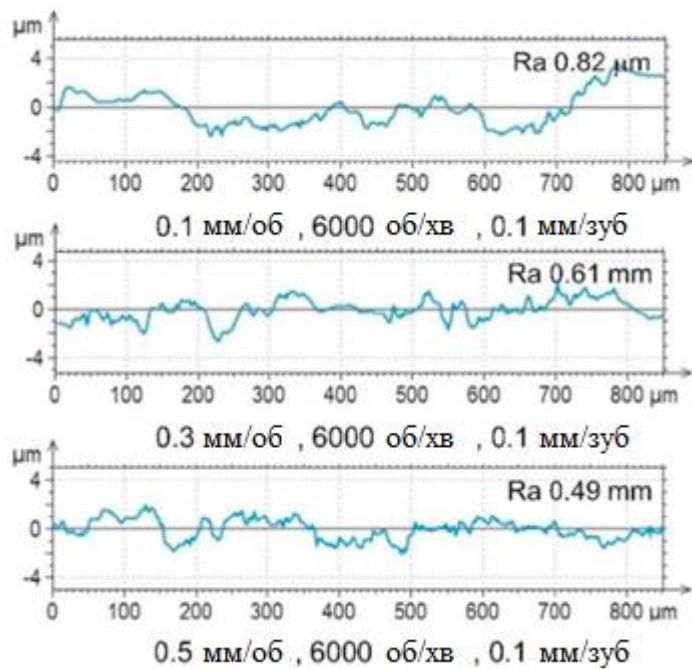


б)

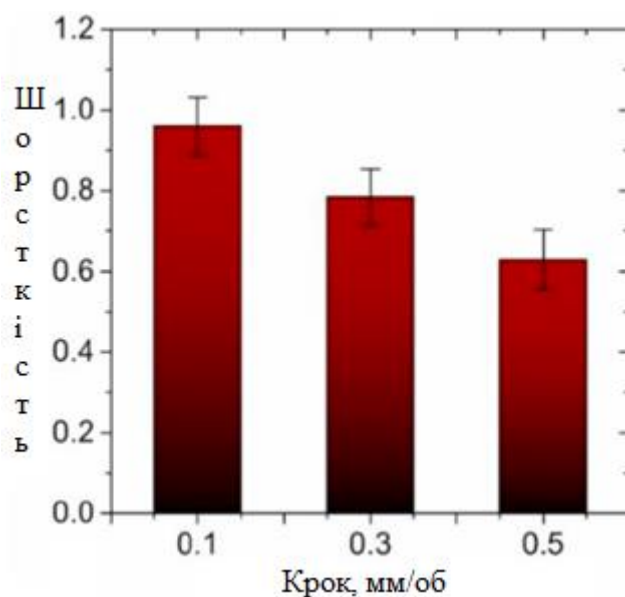
Рис. 2.27. Шорсткості поверхонь отворів:

а - профілограма; б – графік залежності шорсткості від радіальної подачі

Визначено [13], що зі збільшенням кроку a_p шорсткість знижується. Дослідження виконували при таких незмінних параметрах: частота 6000 об/хв, радіальна подача 0,1 мм/зуб. Значення кроку a_p варіювали: 0,1 мм/об, 0,3 мм/об, 0,5 мм/об.



а)



б)

Рис. 2.28. Шорсткості поверхонь отворів:

а - профілограма; б – графік залежності шорсткості від кроку

Профіль шорсткості поверхонь оброблених отворів представлено на рисунку 2.28, а. Обробка отвору із осьовим кроком рівним 0,1 мм/об, дозволила отримати шорсткість Ra 0,82 мкм, а максимальну - Ra 1,04 мкм. Збільшення кроку до 0,3 мм/об забезпечило значення середньої шорсткості Ra 0,61, Фрезерна обробка отвору з кроком a_p 0,5 мм/об дозволила досягти шорсткості Ra 0,49 мкм.

Отже, суттєвий вплив на шорсткість має взаємодія параметрів радіальної подачі та частоти обертання шпинделя. Поєднання низької подачі та високої частоти забезпечує нижчі показники шорсткості. В той же час, взаємодія параметрів кроку та частоти, а також кроку та радіальної подачі не має суттєвого впливу на шорсткість (рис. 2.29).

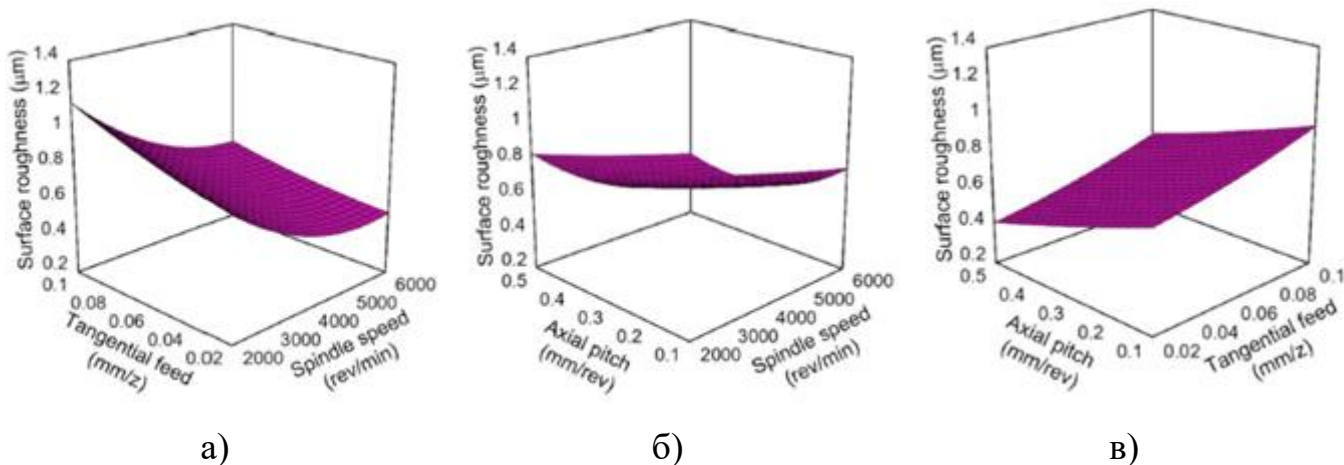


Рис. 2.29. Поверхня відгуку взаємодії із шорсткістю:

а – частоти та радіальної подачі; б – частоти та кроку; в – радіальної подачі та кроку

Мінімальна шорсткість поверхні була досягнута [13] при таких параметрах: частота обертання шпинделя 6000 об/хв, радіальна подача 0,02 мм/зуб і осьовому кроці 0,5 мм/об.

Вплив параметрів обробки на шорсткість обробленого отвору:

- збільшення частоти обертання шпинделя обумовлює зниження сил тертя при обробці, в результаті чого шорсткість покращується;
- при більших частотах обертання відбувається скорочення часу контакту різальної кромки із оброблюваною поверхнею, що також сприяє покращенню шорсткості;
- зменшення сил осьового врізання при збільшенні кроку забезпечує покращення якості поверхні;
- збільшення радіальної подачі призводить до підвищення зусилля фрезерування, а відповідно, знижується якість обробки.

2.7. Висновки

Виконано аналіз процесу обробки отворів фрезеруванням. Досліджено траєкторію руху інструменту під час обробки отворів та виконано аналіз впливу режимів різання та сил різання на точність і якість обробки. Виконано пошук та аналіз особливостей конструкції різального інструменту для фрезерування отворів. Розглянуто процес стружкоутворення при фрезерній обробці отворів.

Фрезерна обробка отворів має такі переваги:

- універсальність за рахунок обробки діапазону діаметрів отворів однією фрезою;
- можливість обробки глухих отворів з плоским дном;
- обробка нежорстких тонкостінних деталей;
- можливість заміни декількох послідовних операцій обробки отвору, наприклад свердління, зенкерування, розточування та розгортання однією фрезерною операцією;
- можливість досягнення 6-8 квалітету точності, що свідчить про чистовий вид обробки;
- досягається шорсткість $Ra\ 0,5\ \mu\text{m}$;
- нижчі сили та температури різання порівняно зі свердлінням;
- можливість корекції траєкторії фрези при зношуванні інструменту.

На основі виконаного аналізу можна зробити такі рекомендації для обробки деталі корпус:

- замінити обробку отворів свердлінням та розгортанням на розфрезерування. Така заміна забезпечить зменшення номенклатури різальних інструментів, зекономить час на обробку отворів. За рахунок правильного вибору режимів різання розфрезерування забезпечить чистовий метод обробки та необхідний квалітет точності 7 та шорсткість поверхні $Ra\ 1,25$;

- застосувати кінцеву фрезу для обробки площин, пазів та отворів, що дасть змогу зменшити кількість різальних інструментів та зменшити вартість виготовлення корпусу.

РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЯ ОБРОБКИ ДЕТАЛІ КОРПУС

3.1. Службове призначення та характеристика корпусу

Деталь корпус (рис. 3.1) входить до апарату висіваючого сівалки.

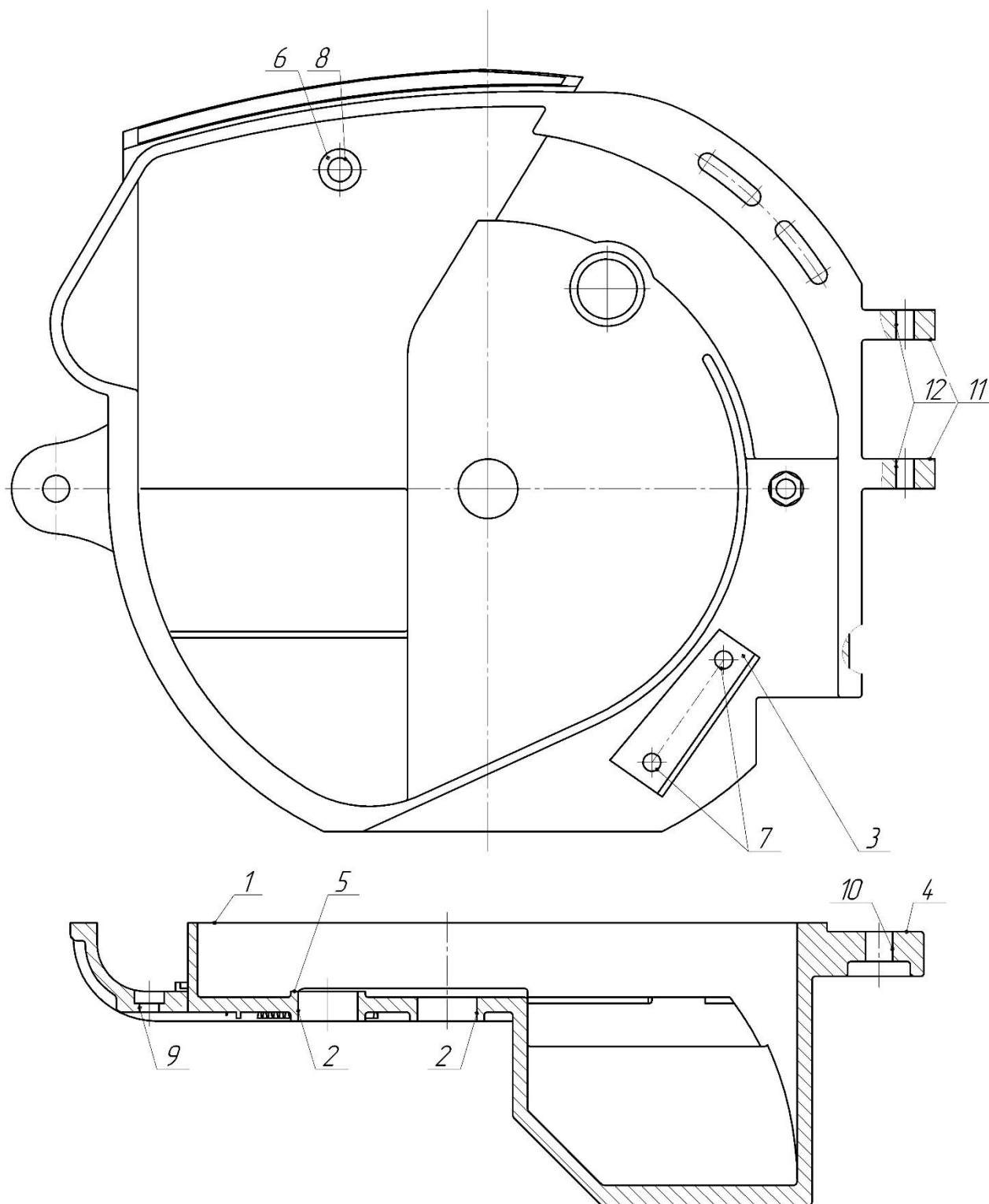


Рис. 3.1 Спрощений ескіз корпусу

Корпус входить до складу сівалки та призначений для розміщення в ньому складових деталей апарату висіваючого. Деталь корпус має таку форму та конфігурацію, яка забезпечує встановлення необхідних деталей апарату висіваючого; орієнтацію апарату висіваючого при встановленні та закріпленні в сівалці.

Для виконання службового призначення деталь корпус має площину та отвори 2 (рис. 3.1), які є функціональними поверхнями корпусу.

Площина 1 та отвори 12 визначають положення деталі в складальній одиниці та є основними площинами.

Для визначення положення приєднуваних деталей, деталь корпус має отвори 7 та 9.

3.2. Розробка технології виготовлення корпусу

Аналіз точності та технологічності

Для визначення точності та якості виготовлення поверхонь деталі корпус, необхідно проаналізувати розміри поверхонь та вимоги, які висуваються до них.

На рисунку 3.1 представлено спрощений ескіз деталі корпус на якому зазначені поверхні, що підлягають обробці. Параметри точності та шорсткості деталі корпус наведено в таблиці 3.1.

Найбільш точними поверхнями деталі корпус є внутрішні циліндричні поверхні: отвори 2 $\varnothing 20+0,021$ шорсткість Ra 1,25; отвір 12 $\varnothing 6+0,012$ шорсткість Ra 3,2.

Інші поверхні деталі характеризуються невисокими квалітетами точності: D11, B12, H14, h14 та шорсткістю Ra 6,3...12,5.

З огляду на вимоги, що висуваються до конструкції деталі, корпус має складну форму та різні види поверхонь: внутрішні циліндричні, плоскі, бонки, пази. Аналіз креслення деталі корпус показав, що в цілому, деталь, з точки зору механічної обробки, є технологічною.

Параметри точності деталі корпус

Позначення поверхні	Назва поверхні	Розмір з відхиленнями, заданими від даної поверхні	Квалітет точності	Точність відносних поворотів, відстаней,	Точність форми	Шорсткість поверхні
1	2	3	4	5	6	7
1	Площина	$30 \pm 0,5$	js15		-	6,3
2	Внутрішня циліндрична поверхня	$\varnothing 20^{+0,021}$	H7		-	1,25
3	Площина	$22 \pm 0,1$	-		-	6,3
4	Площина	$3 \pm 0,3$	-	-	-	12,5
5	Площина	$23 \pm 0,2$	-	-	-	12,5
6	Площина	$3 \pm 0,3$	js16	-	-	12,5
7	Внутрішня циліндрична поверхня	$\varnothing 6^{+0,105}_{+0,03}$	D11		-	12,5
8	Внутрішня циліндрична поверхня	$\varnothing 8,2 \pm 0,36$	H14	-	-	12,5
9	Внутрішня циліндрична поверхня	$\varnothing 6,5 \pm 0,36$	H14	-	-	12,5
10	Внутрішня циліндрична поверхня	$\varnothing 9 \pm 0,36$	B12	 	-	12,5
11	Паз	$40 \pm 0,1$	H10	-	-	6,3
12	Внутрішня циліндрична поверхня	$\varnothing 6 \pm 0,012$	H7	 	-	3,2

Аналіз базового технологічного процесу

Для механічної обробки деталі корпус, за технологічним процесом, поряд з новими верстатами застосовуються застарілі моделі технологічного обладнання. Обрана послідовність дає змогу забезпечити необхідну якість поверхонь та точність обробки, обробка деталі виконується без перевстановлення.

Технологічний процес механічної обробки деталі корпус складається з трьох операцій механічної обробки, на яких задіяні обробний центр з ЧПУ мод. VF-3DHE, фрезерний з ЧПУ мод. 6T15C31, а також вертикально-свердлильний верстат мод. 2H125.

В проєктуємому технологічному процесі механічної обробки деталі корпус планується 010 фрезерну з ЧПУ операцію, яка виконується на вертикально-фрезерному з ЧПУ верстаті мод. 6T15C31 і на якій виконується фрезерування паза, об'єднати з 005 комплексною з ЧПУ операцією, зробивши обробку паза одним із переходів механічної обробки на обробному центрі з ЧПУ. За рахунок цього скоротиться кількість операцій механічної обробки, кількість необхідних верстатів та задіяних робітників. Таким чином, механічна обробка деталі буде відбуватись на двох верстатах, замість трьох.

В технологічному процесі для обробки отворів $\varnothing 20^{+0,021}$ (поз. 2 рис. 3.1) застосовуються дві операції механічної обробки – розсвердлювання та розгортання. Відповідно, задіяно два різальних інструменти – свердло та розвертка. В проєктуємому технологічному процесі планується виконувати обробку даних отворів розфрезеруванням, яке забезпечить задану точність та якість поверхні, а також дозволить скоротити номенклатуру застосовуваних різальних інструментів, час обробки отворів, зменшити вагу заготовки корпусу за рахунок зменшення припусків під обробку отворів.

Вибір заготовки

Враховуючи конструктивну форму деталі корпус та її службове призначення, обираємо метод отримання заготовки - відливання під тиском в прес-форму, а матеріал деталі – алюмінієвий сплав АК12М2.

Хімічний склад та механічні властивості матеріалу наведено в таблицях 3.2 та 3.3 відповідно.

Відливанням під тиском отримують складні, близькі по конфігурації до готових деталей заготовки. Головною особливістю цього процесу є високий тиск на рідкий

метал. В зв'язку з чим можна отримати заготовку з точністю розмірів до 9 квалітету і параметром шорсткості поверхні Rz 40...10.

Таблиця 3.2

Хімічний склад матеріалу деталі корпус

Марка матеріалу	Вміст елементів, %							
	Al	Ti	Fe	Si	Mn	Ni	Zn	Cu
AK12M2	81,55-86,6	до 0,2	0,6-1	11-13	до 0,5	до 0,3	до 0,8	1,8-2,5

Таблиця 3.3

Механічні властивості матеріалу деталі корпус

Марка матеріалу	σ_B	δ	Твердість, HB
	МПа	%	
AK12M2	186-260	1-1,5	700

Вибір методів обробки поверхонь

Маршрут обробки поверхні назначається для тих поверхонь, які підлягають неодноразовій обробці. В деталі корпус, неодноразовій механічній обробці підлягають внутрішні циліндричні поверхні 7. Ці отвори спочатку свердляться, а потім розвертаються. Оскільки, свердління відбувається в суцільному металі, отже, допуск на розмір заготовки відсутній. Тому розрахунок для цієї поверхні не виконуємо і остаточно приймаємо базовий маршрут обробки даної поверхні. Внутрішні циліндричні поверхні 2 також підлягають неодноразовій обробці: розсвердлювання та розгортання. Заміна даного маршруту обробки поверхні на розфрезерування забезпечить заданий допуск на розмір.

Розробка маршруту виготовлення корпусу

Маршрут обробки деталі корпус будуємо з урахуванням обраних маршрутів обробки окремих поверхонь, типу виробництва, технологічних можливостей вибраних металорізальних верстатів, технічних вимог та розмірних зв'язків на кресленні деталі.

Розроблений маршрут обробки наведено в таблиці 3.4.

Таблиця технологічних маршрутів обробки деталі

Маршрутний технологічний процес	
базовий	проектуючий
1	2
001 Транспортна Електрокар Транспортувати заготовки на дільницю механічної обробки	001 Транспортна Електрокар Транспортувати заготовки на дільницю механічної обробки
005 Комплексна з ЧПУ VF-3DHE Обробний центр Фрезерувати: 1 площину, 2 поверхні по контуру, поверхні 2 бонок. Розсвердли 2 отвори, розвернути 2 отвори. Центрувати 2 отвори, свердли 3 отвори, розсвердли 2 отвори, розвернути 2 отвори.	005 Комплексна з ЧПУ VF-3DHE Обробний центр Фрезерувати: 1 площину, 2 поверхні по контуру, поверхні 2 бонок. Розфрезерувати 2 отвори. Центрувати 2 отвори, свердли 3 отвори, розсвердли 2 отвори, розвернути 2 отвори. Фрезерувати паз
010 Фрезерна з ЧПУ 6T15C31 Вертикально-фрезерний з ЧПУ Фрезерувати паз	
015 Вертикально-свердлильна 2H125 Вертикально-свердлильний Свердли подвійний отвір	010 Вертикально-свердлильна 2H125 Вертикально-свердлильний Свердли подвійний отвір
020 Слюсарна Верстак слюсарний Видалити стружку з деталі після механічної обробки	015 Слюсарна Верстак слюсарний Видалити стружку з деталі після механічної обробки
025 Контрольна Стіл контролера Перевірити розміри	020 Контрольна Стіл контролера Перевірити розміри
030 Транспортна Електрокар Транспортувати деталі на дільницю зборки	025 Транспортна Електрокар Транспортувати деталі на дільницю зборки

Вибір технологічних баз

При обробці деталі корпус на 005 операції плоска поверхня є установчою базою, отвір 2 – направляюча база, вісь – опорна база (рис. 3.1). На 010 операції в якості установчої бази використовується площина 1, центральний отвір 2 – направляюча база, отвір 2 – опорна база.

Розробка структури та змісту технологічних операцій, вибір обладнання для їх здійснення

Розробляємо структуру та зміст кожної операції із зазначенням її номера та найменування. Дана розробка виконується на підставі технологічного маршруту

обробки деталі, маршрутів обробки окремих поверхонь та аналізу простановки розмірів з урахуванням технічних вимог до окремих поверхонь,.

Структуру та зміст технологічних операцій наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

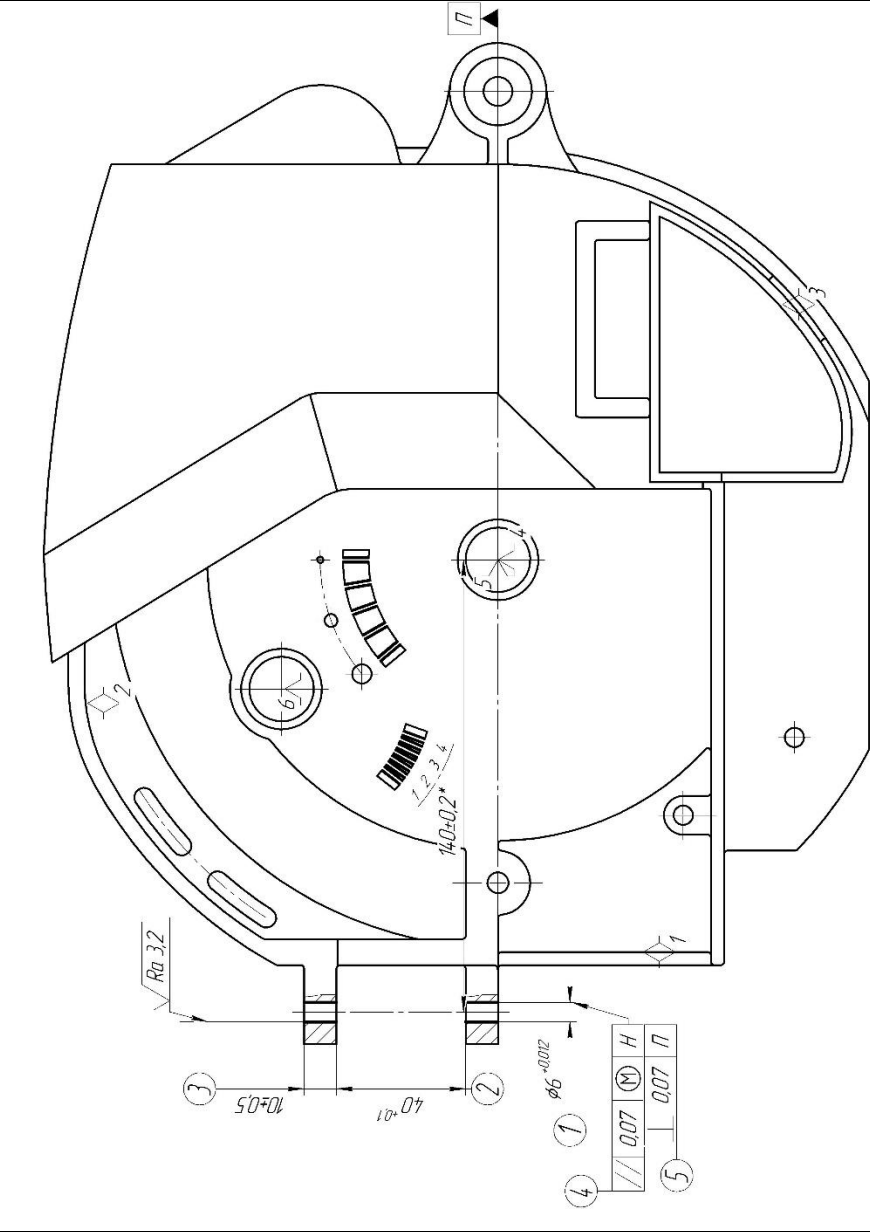
Структура та зміст технологічних операцій обробки корпусу

Операція	Верстат	Операційний ескіз	Зміст операції
1	2		3
005	Комплексу на з ЧПУ	VF-3DNE Обробний центр з ЧПУ	4
1. Встановити та закріпити заготовку.			
2. Фрезерувати торець по контуру, витримуючи розмір 1.			
3. Розфрезерувати 2 отвори на прохід по черзі, витримуючи розміри 2, 3, 4, допуск 5.			
4. Фрезерувати площину, витримуючи розміри 6, 7, допуск 8.			
5. Фрезерувати поверхню Н по контуру, витримуючи розмір 9, допуск 10.			

Продовження табл. 3.5

1	2	3	4
			12. Розсвердлити отвір, витримуючи розміри 13, 14, 22. 13. Свердлити отвір, витримуючи розміри 23, 24. 14. Розсвердлити отвір, витримуючи розміри 25, 26, допуск 27, 28. 15. Відкріпити та зняти деталь. 16. Перевірити розміри. 17. Покласти в тару.

Продовження табл. 3.5

1	2	3	4
010 Верти- кально- сверд- лильна	2Н125 Верти- кально- сверд- лильний		1. Встановити та закріпити деталь. 2. Свердлити подвійний отвір на прохід, витримуючи розміри 1, 2, 3, допуски 4, 5. 3. Відкріпити та зняти деталь. 4. Перевірити розміри. 5. Покласти в тару.

Моделі застосовуваних в розробленому технологічному процесі металорізальних верстатів, а також їх коротка характеристика наведена у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6

Металорізальні верстати для обробки деталі корпус

№ операції	Модель та найменування верстагу	Стисла технічна характеристика				
		Габаритні розміри робочого столу чи макс. діаметр обробки	Ряд частот обертання (хв ⁻¹)	Ряд подач (мм/об)	Потужність (кВт)	Габаритні розміри верстагу (мм)
005	Обробний центр з ЧПУ VF-3DHE	1219x457	8100	25400	22,4	3861x2375x2367
010	Вертикально-свердильний 2H125	400x450	45-2000	0,1-2	2,2	915x785x2350

Вибір пристроїв для затиску деталі

Обрані затискні пристрої та їх стисла характеристика наведені в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7

Затискні пристрої для деталі

Номер операції	Найменування пристрою	Стандарт (код)	Вид приводу
005	Пристрій затискний	Спец.	Пневматичний
010	Пристрій затискний	Спец.	Пневматичний

Вибір різальних інструментів

Механічна обробка поверхонь деталі корпус здійснюється за допомогою різальних інструментів, які забезпечать необхідні параметри точності та шорсткості поверхонь. В проєктуємому технологічному процесі різальні інструменти, які виготовлені за стандартами замінено на більш сучасні, які виготовляються світовими виробниками. Прогресивні різальні інструменти мають вдосконалену геометрію, яка покращує показники процесу обробки та якість оброблених поверхонь. Також, сучасні різальні інструменти виготовляються із нових матеріалів та сплавів і, в деяких випадках, мають покриття із кераміки, кубічного нітриду бору або інших речовин, що дозволяє встановлювати продуктивніші режими різання.

На 005 комплексній з ЧПУ операції виконується обробка таких поверхонь, як: площини, паз, внутрішні циліндричні. Проаналізувавши методи обробки поверхонь, їх форму та розташування, а також вимоги по точності та шорсткості та з метою скорочення номенклатури застосовуваних різальних інструментів, прийнято рішення: застосувати цільну кінцеву фрезу для обробки деяких поверхонь на 005 операції. А саме:

- на 2 переході для фрезерування торцевої поверхні;
- на 3 переході для розфрезерування двох отворів;
- на 4 переході для фрезерування площини;
- на 5 переході для фрезерування площини по контуру;
- на 6 та 7 переходах для фрезерування бонок;
- на 8 переході для фрезерування пазу.

Характеристики вибраного інструменту для обробки поверхонь деталі корпус наведені в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8

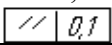
Ріжучий інструмент для механічної обробки деталі корпус

Номер		Найменування інструменту	Стандарт на конструкцію інструменту (код)	Матеріал різальної частини
Операції	Переходу			
1	3	4	5	6
005	2-8	Фреза Ø16	AES 3160	UF10
	9	Свердло центрувальне Ø12	CEM 1216	UF10
	10	Свердло Ø5,9	CoroDrill 460 460.1-0590-030A1-XM	UF10
	11	Розвертка Ø6	CoroReamer 435 435.T-0600-A1-XF	UF10
	12	Свердло Ø8,2	CoroDrill 460 460.1-0820-041A1-XM	UF10
	13	Свердло Ø6,5	CoroDrill 460 460.1-0650-049A1-XM	UF10
	14	Свердло Ø9	CoroDrill 460 460.1-1000-030A1-XM	UF10
010	2	Свердло Ø6	CoroDrill 861 861.1-0600-072A1-GM	UF10

Вибір вимірювальних пристроїв та інструментів

Засоби технічного контролю технічних операцій, вибрані для вимірювань поверхонь деталі корпус, наведені в таблиці 3.9.

Вимірювальний інструмент і контрольні пристрої

Номер			Параметр деталі, який контролюється	Найменування вимірювального інструменту	Стандарт на конструкцію
Операції	Позиції	Переходу			
1	2	3	4	5	6
005		3	$\varnothing 20^{+0,021}$	Калібр-пробка 8133-0934	СТП509-8.70-71
		4	$22^{+0,1}$ $2 \pm 0,3$ 	Штангенциркуль ШЦЦ-1-125-0,1	ДСТУ 166:2009
		5, 6, 7	$30 \pm 0,5$ $3 \pm 0,3$ 	Плита повірочна 1-1-630x400 Лінійка повірочна ЛЧ-0-320 Набір щупів №2 кл. точн. 2	ДСТУ 6026:2008 ДСТУ 6026:2008 ТУ 2-034-0221197-011-91
		8	$30 \pm 0,1$ $40^{+0,1}$	Спецвимірювач Шаблон Штангенциркуль ШЦЦ-1-125-0,1	СТП509.8519-4106 СТП509.8160-4370 ДСТУ 166:2009
		11	$\varnothing 6^{+0,105}_{+0,03}$	Калібр-пробка 8133-0913	СТП509-8.70-71
		12	$\varnothing 8,2^{+0,36}$	Штангенциркуль ШЦЦ-1-125-0,1	ДСТУ 166:2009
		13	$\varnothing 6,5^{+0,36}$	Калібр-пробка 8133-0915	СТП509-8.70-71
		14	$\varnothing 9^{+0,36}$	Калібр-пробка 8133-0920	СТП509-8.70-71
010		2	$\varnothing 6^{+0,012}$	Штангенциркуль ШЦЦ-1-125-0,1	ДСТУ 166:2009

Всі інші розміри деталі корпус, які не представлені в таблиці контролюються за допомогою штангенциркулів: ШЦ-ІІ-160-0,1; ШЦ-ІІІ-315-0,1 ДСТУ 166:2009.

Визначення припусків та операційних розмірів

Припуски на поверхні деталі корпус, що підлягають механічній обробці наведено в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10

Зведена таблиця припусків на обробку деталі корпус

№ поверхні	Найменування поверхні	Припуск	Допуск
1	2	3	4
1	Площина	2	1
2	Внутрішня циліндрична	1	0,021
3	Площина	2	0,1
5	Площина	1,5	0,4

1	2	3	4
6	Площина	1	0,6
7	Внутрішня циліндрична	3	0,075
8	Внутрішня циліндрична	1	0,36
9	Внутрішня циліндрична	3,25	0,36
10	Внутрішня циліндрична	1,5	0,36
11	Паз	1,5	0,1
12	Внутрішня циліндрична	3	0,012

Визначення режимів різання

Режими різання на переході де застосовується різальний інструмент світових виробників таких, як корейський бренд TaeguTec, шведський бренд Sandvic coromant та ін. вибираємо із рекомендацій зазначених в каталогах інструменту. В каталогах вказано рекомендовані значення подачі, глибини різання та швидкості різання. Необхідно виконати розрахунок частоти обертання шпинделя та відкоригувати значення швидкості різання.

Значення режимів різання на деяких переходах базового технологічного процесу де застосовується інструмент ф.ТаeguTec дещо відрізняються від значень вказаних у каталозі. Це пов'язано із тим, що в базовому технологічному процесі зазначені показники режимів різання уже перевірені експериментальним шляхом. В зв'язку з цим в розробленому технологічному процесі приймаємо саме ці значення.

Враховуючи вище зазначене, із каталогів інструменту ф.ТаeguTec вибираємо режими різання.

Нижче представлена методика вибору режимів різання для переходу 5 – фрезерування площини 005 операції комплексної з ЧПУ обробки деталі корпус. В каталозі інструментів із таблиці рекомендованих режимів різання обираємо необхідні параметри. Оскільки матеріал деталі алюміній, матеріал кінцевої фрези (рис. 2.17) – твердий сплав UF10.

Приймаємо необхідні величини режимів різання:

- подача – 0,2 мм/зуб
- глибина різання – 2 мм
- швидкість різання - 150 м/хв.

Розраховуємо частоту обертання:

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 150}{3,14 \cdot 16} = 2985 \text{ об/хв.}$$

Приймаємо $n_\partial = 3000$ об/хв.

Дійсна швидкість різання:

$$V_\partial = \frac{\pi \cdot D \cdot n_\partial}{1000} = \frac{3,14 \cdot 16 \cdot 3000}{1000} = 151 \text{ м/хв.}$$

Основний час фрезерування площини:

$$T_o = \frac{l + l_1 + l_2}{S_{\text{хв}}}$$

де l – довжина оброблюваної поверхні, мм

l_1, l_2 – величини врізання та перебігу відповідно, мм

$S_{\text{хв}}$ – хвилинна подача на зуб, мм/хв

$$S_{\text{хв}} = S_z \cdot Z \cdot n_\partial$$

де Z – кількість зубців фрези

$$S_{\text{хв}} = 0,2 \cdot 3 \cdot 3000 = 1800 \text{ мм/хв}$$

$$T_o = \frac{1140+5+5}{1800} = 0,64 \text{ хв}$$

Нижче представлена методика вибору режимів різання для переходу 3 – розфрезерування отворів 005 операції комплексної з ЧПУ обробки деталі корпус. Діаметр отвору заготовки 18 мм, діаметр отвору розфрезерованого – 20 мм. Припуск під обробку 1 мм, довжини отворів 8 мм та 10 мм.

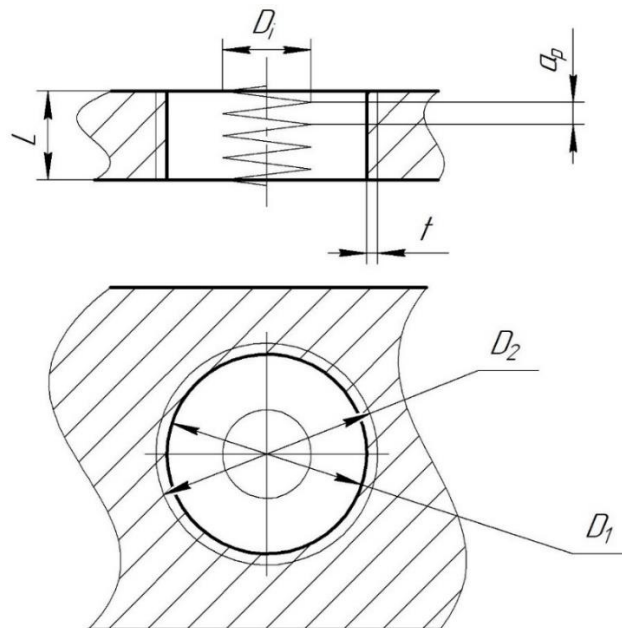


Рис. 3.2. Схема гвинтової інтерполяції при розфрезеруванні отвору

Приймаємо необхідні величини режимів різання:

- подача – 0,07-0,2 мм/зуб. Для забезпечення шорсткості Ra 1,25 мкм приймаємо

$$s_z = 0,07 \text{ мм/зуб}$$

- глибина різання t – 1 мм

- швидкість різання – 150 м/хв

- крок гвинтової інтерполяції – 2 мм/об

Розраховуємо частоту обертання:

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 150}{3,14 \cdot 16} = 2985 \text{ об/хв.}$$

Приймаємо $n_\partial = 3000$ об/хв.

Дійсна швидкість різання:

$$V_\partial = \frac{\pi \cdot D \cdot n_\partial}{1000} = \frac{3,14 \cdot 16 \cdot 3000}{1000} = 151 \text{ м/хв.}$$

Розраховуємо хвилинну подачу:

$$s_{\text{хв}} = 0,07 \cdot 3 \cdot 3000 = 630 \text{ мм/хв}$$

Основний час розфрезерування отвору:

$$T_o = \frac{\pi \cdot D_i}{s_{\text{хв}}} \cdot i$$

де D_i – діаметр гвинтової інтерполяції, мм

i – кількість витків гвинтової інтерполяції

$$i = \frac{L}{B}$$

де L – довжина отвору, мм

B – ширина фрезерування, мм. $B = a_p$

$$i_1 = \frac{8}{2} = 4$$

$$i_2 = \frac{10}{2} = 5$$

$$T_o = \frac{3,14 \cdot 4}{630} \cdot 9 = 0,18 \text{ хв}$$

За таким же принципом приймаємо режими різання для виконання всіх інших переходів операцій механічної обробки поверхонь деталі корпус, на яких застосовується інструмент ф.ТаегуТес.

Результати вибору та розрахунку режимів різання на інші операції представлено в таблиці 3.11.

Таблиця 3.11

Режими різання на операціях механічної обробки деталі корпус

Номер		t, мм	S, мм/об S, мм/зуб	V, м/хв	n, об/хв	t _о , хв
операції	переходу					
1	2	3	4	5	6	7
005	2	0,1	0,5	150	3000	0,07
	3	1	2 0,07	151	3000	0,18
	4	2	0,85	125	2500	0,02
	5	2	0,2	151	3000	0,64
	6	1,5	0,11	251	2500	0,04
	7	1	0,084	251	2500	0,04
	8	1,5	0,05	45	400	0,42
	9	-	0,039	95	2500	0,024
	10	2,9	0,039	47	2500	0,14
	11	0,1	0,1	11	600	0,1
	12	1	0,07	15	600	0,24
	13	3,25	0,039	13	600	0,16
	14	1,5	0,075	17	600	0,32
010	2	3	0,18	13	700	0,26

Технічне нормування операцій

Технічне нормування виконуємо для 005 операції комплексної з ЧПУ обробки корпусу.

Зміст операції:

005 комплексна з ЧПУ

Обробний центр з ЧПУ VF-3DHE

1. Встановити та закріпити заготовку.
2. Фрезерувати торець.
3. Розфрезерувати 2 отвори.
4. Фрезерувати площину.
5. Фрезерувати поверхню.
6. Фрезерувати поверхню бонки.
7. Фрезерувати поверхню бонки.

8. Фрезерувати паз.
9. Центрувати 2 отвори.
10. Свердлити 2 отвори.
11. Розвернути 2 отвори.
12. Розсвердлити отвір.
13. Свердлити отвір.
14. Розсвердлити отвір.
15. Відкріпити та зняти деталь.
16. Перевірити розміри.
17. Покласти в тару.

Час циклу автоматичної роботи верстату по програмі складається із основного часу автоматичної роботи верстата і машинно-допоміжного часу:

$$T_{\text{ца}} = T_o + T_{\text{мв}}$$

Машинно-допоміжний час визначається за формулою:

$$T_{\text{мв}} = T_{\text{мв.ін.}} + T_{\text{мв.х}},$$

де: $T_{\text{мв.ін.}}$ - машинно-допоміжний час на автоматичну зміну інструменту, хв.;

$T_{\text{мв.х}}$ - машинно-допоміжний час на виконання автоматичних ходів і технологічні паузи.

Для верстата VF-3DHE застосовується система ЧПУ – Fanuc. Швидкість переміщення робочих органів верстату по осям координат x, y, - 18 м/хв. На даному верстаті можна виконувати фрезерування, свердління, різьбонарізання.

Машинно-допоміжний час на автоматичну зміну інструмента, визначаємо за формулою:

$$T_{\text{мв.ін.}} = K_{\text{п}} \cdot T_{\text{ін}} + T_{\text{іф}}$$

де $K_{\text{п}}$ - кількість змін інструмента;

$T_{\text{ін}}$ - час повороту інструментального магазину на одну позицію;

$T_{\text{іф}}$ - час фіксації.

Час повороту інструментального магазину на одну позицію та час фіксації.

$$T_{\text{мв.ін.}} = 8 \cdot 10 + 2 = 82 \text{ с} \approx 1,37 \text{ хв.}$$

Машинно-допоміжний час на виконання автоматичних ходів і технологічні паузи визначаємо за формулою:

$$T_{\text{мв.х}} = \sum_{j=1}^m \frac{L_{\text{хх}j}}{S_{\text{мy}}}$$

де: $L_{\text{хх}j}$ - довжина шляху j -тої ділянки автоматичного допоміжного ходу;

$S_{\text{мy}}$ - хвилинна подача прискореного ходу;

j - 1, 2, ..., m - число ділянок автоматичних допоміжних ходів.

$$T_{\text{мв.х}} = \frac{10 \cdot 2 + 7 + 12 \cdot 5 + 33 \cdot 2 + 9 + 36 \cdot 2 + 36 + 11 + 5 + 5 + 5 \cdot 2}{1000} = 0,139 \text{ хв.}$$

$$T_{\text{мв}} = 1,37 + 0,139 = 1,509 \text{ хв.};$$

Час циклу автоматичної роботи верстату по програмі:

$$T_{\text{ца}} = (0,07 + 0,18 + 0,02 + 0,64 + 0,04 + 0,04 + 0,48 + 0,024 + 0,14 + 0,1 + 0,24 + 0,16 + 0,32) + 1,509 = 3,783 \text{ хв.}$$

Штучний час визначаємо за формулою:

$$T_{\text{ш}} = (T_{\text{ца}} + T_{\text{д}}) \cdot \left(1 + \frac{a_{\text{тех.}} + a_{\text{орг.}} + a_{\text{від.}}}{100}\right)$$

Допоміжний час:

$$T_{\text{д}} = T_{\text{уст}} + T'_{\text{уст}} + T_{\text{в.оп.}} + T_{\text{вим}},$$

де: $T_{\text{уст}}$ - час на встановлення та зняття деталі. $T_{\text{уст}} = 0,65 \text{ хв.}$;

$T'_{\text{уст}}$ - час на переустановку деталі. $T'_{\text{уст}} = 0,1 \text{ хв.}$;

$T_{\text{в.оп.}}$ - час пов'язаний з операцією. $T_{\text{в.оп.}} = 0,12 \text{ хв.}$;

$T_{\text{вим}}$ - час на контрольні виміри, вміщує час на вимірювання штангенциркулем, шаблоном, спеціальним вимірювачем, калібр-пробкою;

$$T_{\text{вим}} = 0,05 + 0,06 + 0,045 \cdot 4 = 0,29 \text{ хв.}$$

$$T_{\text{д}} = 0,56 + 0,1 + 0,12 + 0,29 = 1,07 \text{ хв.}$$

Час на організацію і технічне обслуговування робочого місця, відпочинок і особисті потреби приведені у відсотках від оперативного часу.

$$a_{\text{тех}} + a_{\text{орг}} + a_{\text{від}} = 9\%$$

$$T_{\text{ш}} = (3,783 + 1,07) \cdot 1,09 = 5,29 \text{ хв.}$$

Підготовчо-заключний час $T_{\text{пз}} = 14 \text{ хв.}$

Результати вибору та розрахунків норм часу представлено в таблиці 3.12.

Таблиця 3.12

Норми часу на обробку деталі

Номер операції	t_o , хв.	T_{MB} , хв.	t_d , хв.	$t_{обсл}$, хв.		$t_{пер}$, хв.	$t_{шт}$, хв.	$T_{пз}$, хв.	$t_{шт-к}$, хв.
				$t_{т.о.}$	$t_{о.о.}$				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
005	2,274	1,509	1,07	0,4368			5,29	14	5,31
010	0,26	0,12	0,2	0,14			0,72	8	0,73

3.3. Висновки

Розроблений технологічний процес механічної обробки деталі корпус забезпечує задані показники по точності та якості обробки поверхонь. Він складається з двох операцій механічної обробки на яких задіяні обробний центр з ЧПУ мод. VF-3DHE та вертикально-свердлильний верстат мод. 2H135. На відміну від базового, який складається із трьох операцій та в якому поряд із зазначеними верстатами ще застосовується вертикально-фрезерний з ЧПУ моделі 6T15C31. Обробка двох отворів 2 виконується розфрезеруванням методом гвинтової інтерполяції, що дозволило зменшити кількість переходів на 005 операції. Площини, пази та вищезазначені отвори підлягають обробці кінцевою фрезою, що забезпечує зменшення номенклатури різальних інструментів, які застосовуються при обробці деталі корпус.

Виконано розрахунки режимів різання та норм часу. За рахунок застосування прогресивних різальних інструментів, а, відповідно і скоригованих режимів різання, скоротився час обробки деталі.

РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

4.1. Розрахунок потрібної кількості обладнання та коефіцієнту його завантаження

Потребу в обладнанні на операціях проєктного технологічного процесу механічної обробки деталі корпус визначимо згідно [3, с. 4] за формулою:

$$q_{p(i)} = \frac{N_z \cdot t_{um(i)}}{F_{\partial pm} \cdot 60 \cdot k_g}, \quad (4.1)$$

де N_z – річна програма запуску деталі (за попередніми розрахунками $N_z=60000$ шт.);

$t_{um(i)}$ - штучний час i -ої операції, хв.;

$F_{\partial pm}$ - дійсний річний фонд часу роботи обладнання (за попередніми розрахунками $F_{\partial pm} = 4176$ год.):

k_g - нормативний коефіцієнт виконання норм часу (приймається у розмірі 1,01-1,1 згідно з [3, с. 4]).

На операції 005 техпроцесу:

$$q_{p(005)} = \frac{12000 \cdot 5,29}{3680 \cdot 60 \cdot 1,0} = 0,288$$

Розрахунки виконані аналогічно за іншими операціями технологічного процесу зведено до табл. 5.1.

Коефіцієнт завантаження обладнання по кожній деталі-операції:

$$\eta_{z(i)} = \frac{q_{p(i)}}{q_{np(i)}} \quad (4.2)$$

де $q_{np(i)}$ - прийнята (ціла) кількість робочих місць.

На операції 005 техпроцесу:

$$\eta_{z(1)} = \frac{0,288}{1} = 0,288.$$

Аналогічно виконані розрахунки по інших операціях техпроцесу зведено до таблиці 4.1.

Середній коефіцієнт завантаження робочих місць на усіх операціях технологічного процесу виготовлення деталі:

$$\bar{\eta}_3 = \frac{\sum_{i=1}^m q_{p(i)}}{\sum_{i=1}^m q_{np(i)}} = \frac{0,327}{2} = 0,16 \quad (4.3)$$

де m - кількість операцій технологічного процесу.

Таблиця 4.1

Розрахунок завантаження обладнання

№ операції	Найменування операції	t_{um} , хв.	Кількість обладнання		η_3	$\bar{\eta}_3$
			q_p	q_{np}		
005	Комплексна з ЧПУ	5,29	0,288	1	0,288	0,16
010	Вертикально-свердлильна	0,72	0,039	1	0,039	
	Всього	6,01	0,327	2	0,327	

Середній коефіцієнт завантаження відповідає великосерійному типу виробництва (ВС).

4.2. Розрахунок календарно-планових нормативів

До календарно-планових нормативів серійного виробництва належать: розмір партії деталей; кількість запусків партії деталей; періодичність (ритм) запуску-випуску партії деталей; тривалість операційних та технологічних циклів обробки деталі; розмір циклового запасу деталей.

Для визначення розрахункового розміру партії деталей n_p скористаємося методом [3, с. 5], який застосовується у тому разі, коли в технологічному процесі відсутні трудомісткі за переналагоджуванням операції (T_{n-3} не перевищує 30 хв.). Щоб не допускати частих переналагоджувань обладнання, час виготовлення партії деталей на найбільш продуктивній операції не повинен бути меншим, ніж половина зміни. Тобто:

$$n_p = \frac{0,5F_{зм.д}}{t_{um}^{min}}, \quad (4.4)$$

де $F_{зм.д}$ - дійсний фонд часу зміни (440 хв.);

$t_{ум}^{min}$ - штучний час на найбільш продуктивній операції техпроцесу, хв.

$$n_p = \frac{0,5 \cdot 440}{0,7272} \approx 303 \text{ шт.}$$

Для спрощення планування та обліку, партія деталей повинна укладатися в річну програму запуску ціле число разів. Тому, після визначення розрахункової *кількості партій* протягом року за формулою:

$$A_p = \frac{N_3}{n_p} = \frac{12000}{303} = 40, \quad (4.5)$$

визначимо фактичну кількість партій (A_ϕ) шляхом підбору найближчого до A_p цілого значення з уніфікованого ряду:

$$1, 2, 4, 8, 12, 18, 24, 36, 48, 52, 104, 250,$$

після чого скорегуємо, відповідно до отриманого значення A_ϕ , розмір партії деталей:

$$n_{np} = \frac{N_3}{A_\phi} = \frac{12000}{36} = 334 \text{ шт.} \quad (4.6)$$

Періодичність (ритм) запуску-випуску партій деталей:

$$R_3 = \frac{T_p}{A_\phi} = \frac{250}{36} = 6,9 \text{ роб. днів}, \quad (4.7)$$

де T_p - кількість робочих днів протягом року.

Тривалість операційного циклу:

$$T_{o(i)} = \frac{n_{np} \cdot t_{к-д(i)}}{S \cdot F_{зм.д}}, \quad (4.8)$$

де $t_{к-д(i)}$ – калькуляційно-дійсний час на даній детале-операції, хв.

$$t_{к-д(i)} = \frac{t_{ум(i)}}{k_\epsilon \cdot p_{m(i)} \cdot q_{np(i)}} + \frac{t_{n-з(i)}}{n_{np}}, \quad (4.9)$$

де $p_{m(i)}$ – технологічна партія деталей (кількість деталей, що одночасно оброблюються в багатопозиційному пристосуванні), шт.

$q_{np(i)}$ – кількість робочих місць, які працюють на даній операції паралельно.

Наприклад, для операції 005:

$$t_{к-д(005)} = \frac{5,29}{1 \cdot 1 \cdot 1} + \frac{18}{334} = 5,332 \text{ хв.}$$

$$T_{o(005)} = \frac{334 \cdot 5,332}{2 \cdot 440} = 2,02 \text{ дн.}$$

Результати розрахунків $t_{\kappa-\partial(i)}$ і $T_{o(i)}$ зведемо до таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Розрахунок тривалості циклу

№ опер	Найменування операції	t_{um} , хв.	t_{n-3} , хв.	$t_{\kappa-\partial}$, хв.	T_o , днів	t_{mo} , днів
005	Комплексна з ЧПУ	5,29	14	5,332	2,02	0,3
010	Вертикально-свердлильна	0,72	8	0,751	0,29	0,3
	Всього	6,01	-	6,083	2,31	0,6

При груповому розташуванні обладнання, невеликій масі деталей та тривалості операційних циклів, що в середньому не перевищують два дні може бути обраний послідовний рух.

Тривалість виробничого циклу визначаємо за формулою:

$$T_n = \sum_{i=1}^m T_{o_i} + \sum_{i=1}^m t_{mo} = 2,31 + 0,6 = 2,9 \text{ днів}, \quad (4.10)$$

де t_{mo} - час міжопераційної перерви, днів.

$$t_{mo} = \frac{(0,25 \dots 0,8) \cdot \sum_{i=1}^m T_{o_i}}{m} = \frac{0,25 \cdot 2,31}{2} = 0,3 \text{ дні}, \quad (4.11)$$

Графік послідовного руху партії деталей представлено на рис. 4.1.

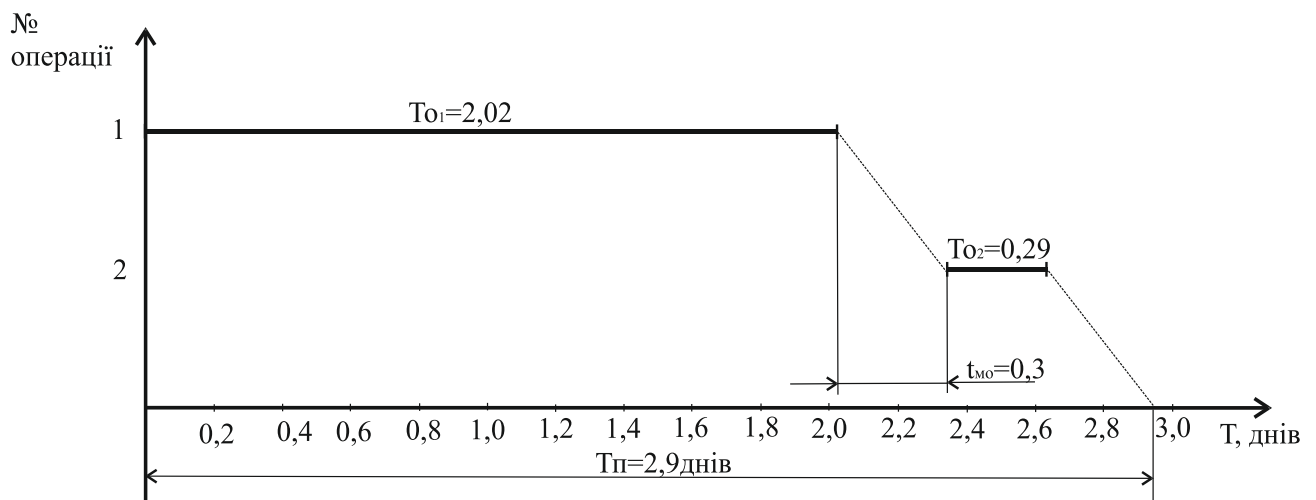


Рис. 4.1 Графік послідовного руху партії деталей корпус 334 шт.

Середній розмір *циклового запасу* деталей визначається за формулою:

$$Z_{\text{ц}} = \frac{n_{\text{пр}} \cdot T_n}{R_3} = \frac{334 \cdot 2,9}{6,9} = 141 \text{ шт.} \quad (4.12)$$

4.3. Визначення чисельності основних робітників цеху

До основних належать робітники, безпосередньо зайняті виконанням технологічних операцій. Їх чисельність у великосерійному виробництві визначається за формулою:

$$R_o = \frac{T_p}{F_{\text{др}}}, \quad (4.13)$$

де T_p - трудомісткість річної виробничої програми, нормо-годин.

$$T_p = N_3 \cdot \sum_{i=1}^m \frac{t_{\text{ум}_i}}{60} \cdot K_{\text{дов}} \cdot (1 + 0,01 \cdot d), \quad (4.14)$$

де $K_{\text{дов}}$ - коефіцієнт довантаження обладнання до нормативного ($\eta_{3н}$) для даного типу виробництва [3, дод. Д1]:

$$K_{\text{дов}} = \frac{\eta_{3н}}{\bar{\eta}} = \frac{0,8}{0,16} = 5,0 \quad (4.15)$$

d - процент додаткових робіт, непередбачених технологічним процесом (виправлення браку, доробка, комплектація тощо), $d=15...20\%$;

$F_{\text{др}}$ - дійсний річний фонд часу роботи одного робітника, год. (залежить від номінального фонду часу поточного року F_n , зменшеного на процент невиходів на роботу з поважних причин C_n (8...10%)):

$$F_{\text{др}} = F_n \cdot (1 - 0,01 \cdot C_n) = 2000 \cdot (1 - 0,01 \cdot 8) = 1840 \text{ год.}, \quad (4.16)$$

$$T_p = 12000 \cdot \frac{6,01}{60} \cdot 5,0 \cdot (1 + 0,01 \cdot 20) = 7220 \text{ нормо-год.}$$

$$R_o = \frac{7220}{1840} = 4 \text{ особи.}$$

4.4. Аналіз варіантів технологічного процесу

Для того, щоб довести доцільність впровадження запропонованого у даній дипломній роботі варіанту технологічного процесу, необхідно зробити його економічний аналіз. Цей аналіз здійснюється шляхом визначення та порівняння технологічної собівартості виготовлення деталі по кожному з альтернативних варіантів (базовому і проектному):

$$C_{tex} = V \cdot N_z + P, \quad (4.17)$$

де V – змінні витрати у технологічній собівартості, величина яких змінюється пропорційно зміні обсягу випуску продукції, грн./рік.

P – постійні витрати, величина яких не змінюється або змінюється неістотно в залежності від зміни річного випуску продукції грн./рік.

Порівнюючи варіанти технологічного процесу, проаналізуємо та зіставимо лише ті статті витрат, величина яких змінюється при переході від одного варіанту до іншого. Так само, порівнювати доцільно лише операції, які відрізняються (табл. 4.3, 4.4).

Таблиця 4.3

Характеристика змін при обробці деталі корпус

№ оп.	Базовий варіант		Розряд	№ оп.	Проектний варіант		Розряд
	Найменування операції	t_{um} , хв.			Найменування операції	t_{um} , хв.	
005	Комплексна з ЧПУ	9,6357	4	005	Комплексна з ЧПУ	5,29	4
010	Фрезерна з ЧПУ	7,5436	4				
015	Вертикально-свердлильна	0,7272	3	010	Вертикально-свердлильна	0,72	3
	Всього	17,9065			Всього	6,01	

4.4.1. Розрахунок змінних витрат

За поелементним методом розрахунку змінні витрати визначаються за формулою:

$$V = M_o + Z_{одв} + E_c + B_p + B_{мд} + B_{ін.ун} + B_{пр.ун} + B_{ам.у} + B_{ен}, \quad (4.18)$$

де M_o – вартість основних матеріалів (не змінюються у порівнюваних варіантах), грн.;

$Z_{одв}$ – заробітна плата виробничих робітників основна, додаткова з урахуванням єдиного соціального внеску, грн.;

E_c – витрати на електроенергію силову, грн.;

B_p – витрати на ремонт обладнання, грн.;

$B_{мд}$ – витрати на матеріали допоміжні, грн.;

$B_{ін,ун}$ – витрати на експлуатацію універсального ріжучого інструменту, грн.
(однакові у порівнюваних варіантах);

$B_{ам,у}$ – витрати на амортизацію універсального обладнання, грн.;

$B_{ен}$ – витрати на експлуатацію приміщень, грн.

Витрати на заробітну плату основну, додаткову з урахуванням єдиного соціального внеску:

$$Z_{одв} = C_{z(i)} \frac{t_{ум(i)}}{60} (1 + K_d) \cdot (1 + K_c), \quad (4.19)$$

де $C_{z(i)}$ – годинна тарифна ставка відповідного розряду i -тої операції техпроцесу, грн./год.;

$t_{ум(i)}$ - штучний час i -тої операції, хв.;

K_d, K_c – коефіцієнти, які враховують відповідно додаткову заробітну плату та відрахування на соціальні потреби (єдиний соціальний внесок).

$$Z_{одв.баз} = \frac{77,98 \cdot (9,6357 + 7,5436) + 70,18 \cdot 0,7272}{60} \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) = 31,105 \text{ грн.};$$

$$Z_{одв.баз} = \frac{77,98 \cdot 5,29 + 70,18 \cdot 0,72}{60} \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) = 10,357 \text{ грн.}$$

Наступні статті витрат пов'язано з утриманням та експлуатацією обладнання. Тому, перед їх розрахунком, на основі [3, дод. Д2] складемо таблицю щодо характеристики обладнання, яке використовується у порівнюваних операціях базового та проектного технологічних процесів (табл. 4.4).

Характеристика обладнання

Модель обладнання	Габаритні розміри: довжина × ширина, м	Потужність електродвигунів верстата, кВт	Група ремонтної складності механічної частини, УРО	Площа в плані $S_{од}$, м ²	Оптова ціна, тис. грн.
VF-3DHE Обробний центр	3,861×2,375	22,4	33	9,17	2780,0
6T15C31 Вертикально-фрезерний з ЧПУ	3,425×3,2	7,5	18	10,96	298,0
2H125 Вертикально-свердильний	0,77×0,78	5,5	7	0,60	71,9

Витрати на електроенергію силову:

$$E_c = \frac{N_{\varepsilon} \cdot K_o \cdot K_N \cdot K_{\delta}}{\eta_{\varepsilon} \cdot \eta_m} \cdot \frac{t_{ум}}{60} \cdot C_{ел}, \quad (4.20)$$

де N_{ε} – встановлена потужність електродвигунів обладнання, кВт;

K_o – коефіцієнт одночасної роботи двигунів, $K_o=0,65...0,8$;

K_N – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за потужністю;

K_{δ} – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за часом, $K_{\delta}=0,3...0,5$;

η_{ε} – коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі, $\eta_{\varepsilon}=0,92...0,96$;

η_m – ККД електродвигунів, $\eta_m=0,86...0,9$;

$C_{ел}$ – ціна 1 кВт-год електроенергії без ПДВ, грн.

Для операцій проєктного техпроцесу:

$$E_{c.б(005)} = \frac{22,4 \cdot 0,7 \cdot 0,7 \cdot 0,3}{0,95 \cdot 0,88} \cdot \frac{9,6357}{60} \cdot 7,5 = 4,744 \text{ грн.}$$

Аналогічно виконані розрахунки за іншими операціями базового і проєктного техпроцесів зведемо до табл. 4.5.

Таблиця 4.5

Розрахунок витрат на електроенергію

№ опер.	базовий варіант			№ опер.	проєктний варіант		
	N_{ε} , кВт	$t_{ум}$, хв.	E_c , грн.		N_{ε} , кВт	$t_{ум}$, хв.	E_c , грн.
005	22,4	9,6357	4,744	005	22,4	5,29	2,605

010	7,5	7,5436	1,244	010	2,2	0,72	0,035
015	2,2	0,7272	0,035				
Σ		17,9065	6,023	Σ		6,01	2,639

Витрати на ремонт обладнання:

$$B_p = \frac{W_m \cdot R_m \cdot k_e \cdot t_{um}}{F_{дрм} \cdot 60}, \quad (4.21)$$

де W_m – витрати на всі види ремонту та обслуговування за ремонтний цикл, які припадають на одиницю ремонтної складності механічної частини обладнання, грн.;

R_m – категорія ремонтної складності механічної частини обладнання, УРО;

k_e – коефіцієнт, який враховує витрати на всі види ремонту та обслуговування електричної частини обладнання (приймається в розмірі 1,3).

$$B_{p.б} = \frac{880 \cdot (33 \cdot 9,6357 + 18 \cdot 7,5436 + 7 \cdot 0,7272) \cdot 1,3}{3680 \cdot 60} = 2,337 \text{ грн};$$

$$B_{p.нр} = \frac{880 \cdot (33 \cdot 5,29 + 7 \cdot 0,72) \cdot 1,3}{3680 \cdot 60} = 0,937 \text{ грн.}$$

Витрати на допоміжні матеріали:

$$B_{мд} = \frac{M_{зв} \cdot R_m \cdot t_{um}}{100 \cdot 60} \cdot K_e, \quad (4.22)$$

де $M_{зв}$ – годинні витрати на допоміжні матеріали, коп.;

K_e – коефіцієнт, який враховує тип виробництва.

$$B_{мд.б} = \frac{79,5 \cdot (33 \cdot 9,6357 + 18 \cdot 7,5436 + 7 \cdot 0,7272)}{100 \cdot 60} \cdot 1,1 = 6,688 \text{ грн};$$

$$B_{мд.б} = \frac{79,5 \cdot (33 \cdot 5,29 + 7 \cdot 0,72)}{100 \cdot 60} \cdot 1,1 = 2,618 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію універсального обладнання:

$$B_{ам} = \frac{\Phi_{бал} \cdot H_a \cdot t_{um}}{F_{дрм} \cdot 60 \cdot 100 \cdot \eta_{зн}}, \quad (4.23)$$

де $\Phi_{бал}$ – балансова вартість одиниці обладнання, грн.

$$\Phi_{бал} = C_{онт} \cdot (1 + K_{тр} + K_m + K_\phi), \quad (4.24)$$

де $C_{онт}$ – оптова ціна обладнання, грн.;

$K_{тр}, K_m, K_\phi$ – коефіцієнти, які враховують відповідно витрати на транспортування обладнання (0,05...0,1), його монтаж (0,04...0,06), улаштування фундаменту (0,02...0,08);

Балансова вартість обладнання:

$$\Phi_{бал.VF-3DHE} = 2780000 \cdot 1,16 = 3224800 \text{ грн};$$

$$\Phi_{бал.6T15C31} = 298000 \cdot 1,16 = 345680 \text{ грн};$$

$$\Phi_{бал.2H125} = 71900 \cdot 1,16 = 83404 \text{ грн}.$$

H_a – норма амортизації на реновацію, %.

$$B_{ам.б(005)} = \frac{3224800 \cdot 15 \cdot 9,6357}{3680 \cdot 60 \cdot 100 \cdot 0,8} = 26,387 \text{ грн}.$$

Аналогічно виконані розрахунки за іншими операціями базового та проектного техпроцесу зведемо до табл. 4.6

Таблиця 4.6

Розрахунок амортизаційних відрахувань

№ опер.	базовий варіант			№ опер.	проектний варіант		
	$\Phi_{бал}$, грн.	$t_{ум}$, хв.	$B_{ам}$, грн.		$\Phi_{бал}$, грн.	$t_{ум}$, хв.	$B_{ам}$, грн.
005	3224800	9,6357	6,92	005	3224800	5,29	3,8
010	345680	7,5436	0,26	010	83404	0,72	0,014
015	83404	0,7272	0,014				
Σ	36538884	17,9065	7,194	Σ	3308204	6,01	3,814

Витрати на експлуатацію приміщення:

$$B_{ен} = \frac{S_{од} \cdot k_f \cdot C}{F_{орм} \cdot \eta_{зн}} \cdot \frac{t_{ум}}{60}, \quad (4.25)$$

де $S_{од}$ – площа в плані, яку займає одиниця обладнання, m^2 ;

k_f – коефіцієнт, який враховує додаткову площу (проходи, проїзди, транспортно-складські приміщення) [3, табл. 4].

C – річні витрати, пов'язані з експлуатацією $1m^2$ виробничого приміщення, грн.

$$B_{ен.б(005)} = \frac{9,17 \cdot 2,5 \cdot 780}{3680 \cdot 0,8} \cdot \frac{9,6357}{60} = 0,975 \text{ грн}.$$

Аналогічно виконані розрахунки за іншими операціями базового та проектного техпроцесу зведемо до табл. 4.7.

Таблиця 4.7

Розрахунок витрат на утримання приміщення

Базовий варіант						Проектний варіант					
№ опер.	$S_{од}, м^2$	k_f	$S_{од} \times k_f, м^2$	$t_{ум}, хв.$	$B_{еп.баз}, грн.$	№ опер.	$S_{од}, м^2$	k_f	$S_{од} \times k_f, м^2$	$t_{ум}, хв.$	$B_{еп.пр}, грн.$
005	9,17	2,5	22,93	9,6357	0,975	005	9,17	2,5	22,93	5,29	0,536
010	10,96	2,0	21,92	7,5436	0,730	010	0,60	4,0	2,40	0,72	0,008
015	0,60	4,0	2,40	0,7272	0,008						
Σ			47,25	17,9065	1,713	Σ			25,33	6,01	0,536

4.4.2. Розрахунок постійних витрат

За поелементним методом розрахунку постійні витрати включають:

$$P = B_{нал} + B_{сп.осн} + B_{ам.сп} + B_{пр}, \quad (4.26)$$

де $B_{нал}$ – витрати на налагодження обладнання, грн.;

$B_{сп.осн}$ – витрати на експлуатацію спеціального оснащення, грн. (у базовому та проектному варіантах відсутні);

$B_{ам.сп}$ – витрати на амортизацію спеціального обладнання (у базовому та проектному варіантах відсутні), грн.;

$B_{пр}$ – витрати на створення програмного забезпечення верстатів з ЧПУ, грн.

Витрати на налагодження обладнання:

$$B_{нал} = C_{гн} \cdot \frac{t_{н-з}}{60} \cdot (1 + K_d) \cdot (1 + K_c) \cdot A, \quad (4.27)$$

де $C_{гн}$ – годинна тарифна ставка наладчика відповідного розряду грн./год.;

$t_{н-з}$ – підготовчо-заклучний час даної операції, хв.;

A – кількість партій, що відповідає кількості переналагоджень за рік.

$$B_{нал.баз} = 103,972 \cdot \frac{18+12+8}{60} \cdot (1+0,1) \cdot (1+0,22) \cdot 36 = 3181,29 \text{ грн.};$$

$$B_{\text{нал.пр}} = 103,972 \cdot \frac{18+8}{60} \cdot (1+0,1) \cdot (1+0,22) \cdot 36 = 2176,67 \text{ грн.}$$

Витрати на створення програмного забезпечення:

$$B_{\text{пр}} = T_{\text{пр}} \cdot Z_{\text{год}} \cdot K_{\text{дс}}, \quad (4.28)$$

де $T_{\text{пр}}$ – трудомісткість підготовки програмного забезпечення, яка враховує трудомісткість розробки операційної карти техпроцесу, керуючої програми, карт налагодження інструменту, карти кодування інформації, год. (табл. 4.8);

Таблиця 4.8

Розрахунок трудомісткості керуючої програми

№ опер.	Кількість		Трудомісткість розробки, н/год.				
	поверхонь	розмірів	операційної карти	керуючої програми	карти налагодж. інструменту	карти кодування	Σ
Базовий							
005	10	5	3,95	27,2	0,7	-	31,85
010	10	6	3,95	27,2	0,7	-	31,85
Σ							63,7
Проектний							
005	10	6	3,95	27,2	0,7	-	31,85
Σ							31,85

$Z_{\text{год}}$ – середньогодинна заробітна плата інженера з підготовки програмного забезпечення, грн./год.;

$K_{\text{дс}}$ – коефіцієнт, який враховує додаткову заробітну плату та єдиний соціальний внесок.

$$B_{\text{пр.б}} = 63,7 \cdot 136,8 \cdot 1,342 = 11694,40 \text{ грн.}$$

$$B_{\text{пр.пр}} = 31,85 \cdot 136,8 \cdot 1,342 = 5847,20 \text{ грн.}$$

4.4.3. Розрахунок технологічної собівартості

Усі виконані розрахунки змінних та постійних витрат, а також розрахунок технологічної собівартості зведемо до табл. 4.9.

Технологічна собівартість:

$$C_{\text{тех.б}} = 76,559 \cdot 12000 + 120175,70 = 1038884 \text{ грн.};$$

$$C_{\text{тех.пр}} = 32,647 \cdot 12000 + 8023,87 = 399788 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.9

Розрахунок технологічної собівартості

№ з/ п	Статті витрат	Витрати, грн.	
		базовий варіант	проект
1.	<u>Змінні витрати V</u>		
1.1	Заробітна плата виробничих робітників основна, додаткова з єдиним соціальним внеском	31,105	10,357
1.2	Електроенергія силова	6,023	3,655
1.3	Ремонт обладнання	2,377	0,937
1.4	Матеріали допоміжні	6,688	2,618
1.5	Амортизація універсального обладнання	28,653	14,537
1.6	Експлуатація приміщень	1,713	0,543
	Всього змінних витрат	76,559	32,647
2.	<u>Постійні витрати P</u>		
2.1	Налагодження обладнання	3181,29	2176,67
2.2	Створення програмного забезпечення	116994,40	5847,20
	Всього постійних витрат	120175,70	8023,87
	Технологічна собівартість річного випуску деталей $C_{\text{тех}}$	1038884	399788

За критерієм мінімуму технологічної собівартості більш ефективним для заданої програми запуску деталей «корпус» $N_3=12000$ шт. є проєктний варіант технологічного процесу механічної обробки даної деталі.

Для розмежування області ефективного використання порівнюваних варіантів технологічного процесу розрахуємо критичну програму випуску деталей $N_{кр}$, за якої варіанти, що порівнюються, будуть рівноцінними, тобто $C_{\text{тех.б}}=C_{\text{тех.пр}}$:

$$N_{кр} = \frac{P_{пр} - P_{баз}}{V_{баз} - V_{пр}} = \frac{8023,87 - 120175,70}{76,559 - 32,647} = -2554 \text{ шт.} \quad (4.29)$$

Від'ємне значення $N_{кр}$ означає, що за будь-якої програми запуску деталі «корпус» ефективнішим з економічної точки зору є проєктний варіант технологічного процесу механічної обробки даної деталі.

4.5. Розрахунок показників економічної ефективності обраного варіанту технологічного процесу

Річний економічний ефект від застосування обраного варіанту технологічного процесу:

$$E_p = (C_{\text{тех.баз}} + E_n \cdot K_{\text{баз}}) - (C_{\text{тех.пр}} + E_n \cdot K_{\text{пр}}), \quad (4.30)$$

де E_n – нормативний коефіцієнт порівняльної економічної ефективності капітальних вкладень;

$K_{\text{баз}}$, $K_{\text{пр}}$ – відповідно капітальні вкладення базового і проектного варіантів техпроцесу, грн.

Капітальні вкладення по кожному варіанту складаються із вкладень в обладнання $\Phi_{\text{бал}}$, оснащення $B_{\text{осн}}$, а також у приміщення, яке це обладнання займає $K_{\text{буд}}$, скореговані на коефіцієнт завантаження обладнання тих деталей-операцій, які відрізняються у порівнюваних варіантах:

$$K = (\Phi_{\text{бал}} + B_{\text{осн}} + K_{\text{буд}}) \cdot \eta_{z_i}, \quad (4.31)$$

Капітальні вкладення в будівлі розраховуємо за формулою:

$$K_{\text{буд}} = S_{\text{од}} \cdot K_f \cdot q_{\text{пр}} \cdot h \cdot \Pi_{\text{буд}}, \quad (4.32)$$

де h - висота приміщення цеху, м;

$\Pi_{\text{буд}}$ – ціна 1м² виробничої площі висотою 8-10 м, грн./м³.

$$K_{\text{буд.баз}} = 47,25 \cdot 8 \cdot 7200 = 2721600 \text{ грн.};$$

$$K_{\text{буд.пр}} = 25,33 \cdot 8 \cdot 7200 = 1459008 \text{ грн.}$$

Балансова вартість обладнання:

$$\Phi_{\text{бал.баз}} = 3653884 \text{ грн.};$$

$$\Phi_{\text{бал.пр}} = 3308204 \text{ грн.}$$

$$K_{\text{баз}} = (3653884 + 2721600) \cdot 0,32 = 2040155 \text{ грн.}$$

$$K_{\text{пр}} = (3308204 + 1459008) \cdot 0,16 = 762754 \text{ грн.}$$

$$E_p = (1038884 + 0,16 \cdot 2040155) - (399788 + 0,16 \cdot 762754) = 843480 \text{ грн.}$$

4.6. Розрахунок планової цехової собівартості деталі

Цехова собівартість виготовлення деталі визначається як сума калькуляційних статей витрат:

$$C_{\text{цех}} = M_o + Z_{od} + B_c + B_{in} + B_o + B_{\text{ц}}, \quad (4.33)$$

де M_o - вартість основних матеріалів, грн.:

Z_{od} - основна та додаткова заробітна плата основних виробничих робітників, грн.;

B_c - відрахування на соціальні потреби (єдиний соціальний внесок), грн.;

B_{in} - витрати на експлуатацію спеціального оснащення, грн.;

B_o - витрати на утримання та експлуатацію обладнання, грн.;

$B_{\text{ц}}$ - цехові витрати, грн.

Вартість основних матеріалів:

$$M_o = a_p \cdot \Pi_m \cdot K_{mp} - a_{\text{в}} \cdot \Pi_{\text{в}}, \quad (4.34)$$

де a_p - норма витрат матеріалу (алюмінієвий сплав АК12М2), кг;

Π_m - ціна матеріалу, грн./кг;

K_{mp} - коефіцієнт, який враховує транспортно-заготівельні витрати, витрати при зберіганні матеріалів (приймається у розмірі 1,05...1,08);

$a_{\text{в}}$ - маса відходів, кг;

$\Pi_{\text{в}}$ - ціна відходів, грн./кг;

$$M_o = 1,539 \cdot 220,0 \cdot 1,05 - (1,539 - 1,457) \cdot 30,0 = 353,049 \text{ грн.}$$

Заробітна плата основна й додаткова виробничих робітників:

$$Z_{od} = P_{\text{в}} (1 + K_{\text{д}}), \quad (4.35)$$

де $P_{\text{в}}$ - відрядний розцінок на деталь (основна зарплата), що визначається, як сума операційних розцінок $P_{on(i)}$:

$$P_{\text{в}} = \sum_1^m P_{on_i} = \sum_1^m \frac{e_{\text{зод}_i}^{\text{в}} \cdot t_{\text{ум}-\kappa_i}}{60}, \quad (4.36)$$

де $e_{годi}^6$ - годинна тарифна ставка відрядника відповідного розряду роботи i -ої операції технологічного процесу, грн./год.;

$t_{шт-ки}$ - штучно-калькуляційний час i -ої операції технологічного процесу, хв.:

На першій операції техпроцесу:

$$P_{оп1} = 77,80 \cdot \frac{5,344}{60} = 6,929 \text{ грн./шт.}$$

Розрахунок відрядної розцінки на деталь зведемо до табл. 4.10.

Таблиця 4.10

Розрахунок відрядної розцінки на деталь

№ оп.	Найменування операції	$t_{шт-к}$, хв.	Розряд	Годинна тарифна ставка, грн./год.	Розцінка на деталь, грн.
005	Фрезерно-центрувальна	5,344	4	77,980	6,929
010	Токарна з ЧПУ	0,744	3	70,180	0,870
	Всього	6,088	-	-	7,799

$$З_{од} = 7,799 \cdot (1 + 0,1) = 8,579 \text{ грн.}$$

Відрахування на соціальні потреби виробничих робітників:

$$B_c = 8,579 \cdot \frac{22}{100} = 1,887 \text{ грн.,} \quad (4.37)$$

Витрати на експлуатацію спеціального оснащення, що припадають на одну деталь, складають 22-25 грн. на одну нормо-годину трудомісткості виготовлення деталі (менше значення відповідає ДС, більше – ВС).

$$B_{осн} = 25 \cdot \frac{6,01}{60} = 2,504 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання і експлуатацію обладнання:

$$B_o = 7,799 \cdot \frac{320}{100} = 24,957 \text{ грн.,} \quad (4.38)$$

де $\Pi_{во}$ - процент витрат на утримання та експлуатацію обладнання;

$З_o$ - основна заробітна плата за виготовлення деталі, грн.

Загальноцехові витрати в собівартості деталі:

$$B_{ц} = 7,799 \cdot \frac{280}{100} = 21,837 \text{ грн.,} \quad (4.39)$$

де $\Pi_{ц}$ – процент цехових витрат.

Калькуляцію цехової собівартості деталі слід звести до табл. 4.11.

Таблиця 4.11

Калькуляція цехової собівартості виготовлення деталі

№ з/п	Найменування статей	Витрати, грн.
1.	Матеріали основні з відрахуванням зворотних відходів	353,049
2.	Основна заробітна плата виробничих робітників	7,799
3.	Додаткова заробітна плата виробничих робітників	0,78
4.	Відрахування у соціальні фонди	1,887
5.	Експлуатація спеціального оснащення	2,504
6.	Витрати на утримання і експлуатацію обладнання	24,957
7.	Цехові витрати	21,837
8.	Всього цехова собівартість $C_{ц}$	412,813

4.7. Планування підсумкових техніко-економічних показників

Крім показників, розрахованих у попередніх розділах дипломної роботи, слід додатково визначити такі:

- *зниження трудомісткості* виготовлення деталі при впровадженні проектного варіанту техпроцесу (у відсотках):

$$\Delta T_p = \frac{\sum_{i=1}^m t_{um(i)}^{баз}}{\sum_{i=1}^m t_{um(i)}^{np}} \cdot 100 - 100 = \frac{17,9065}{6,01} \cdot 100 - 100 = 197,9\%, \quad (4.40)$$

- *виріток продукції на одного робітника*:

$$B_n = \frac{T_p}{R_o} = \frac{7220}{4} = 1805 \text{ нормо-год./ос.}, \quad (4.41)$$

де T_p – трудомісткість річної виробничої програми дільниці, нормо-год.;

R_o – чисельність основних робітників цеху, осіб;

- *зарплатомісткість продукції*:

$$З_{zn} = \frac{З_{од}}{C_{ц}} \cdot 100 = \frac{8,579}{412,813} \cdot 100 = 2,1\%, \quad (4.42)$$

де $Z_{од}$ – основна й додаткова заробітна плата у собівартості деталі, грн.;

$C_{ц}$ - цехова собівартість деталі, грн.

- матеріаломісткість продукції:

$$Z_{мн} = \frac{M_o}{C_{ц}} \cdot 100 = \frac{353,049}{412,813} \cdot 100 = 85,5\%, \quad (4.43)$$

де M_o – матеріали основні з відрахуванням зворотних відходів у собівартості деталі, грн.

- собівартість товарної продукції цеху:

$$C_{mn} = C_{ц} \cdot N_z \cdot K_{дов} = 412,813 \cdot 12000 \cdot 5,0 = 24768780 \text{ грн.} \quad (4.44)$$

Підсумкові техніко-економічні показники зведемо до табл. 4.11.

Таблиця 4.11

Підсумкові техніко-економічні показники

№ з/п	Показник	Одиниця виміру	Величина
1.	Програма запуску деталі (N_z)	шт./рік	12000
2.	Трудомісткість виробничої програми (T_p)	нормо-год.	7220
3.	Цехова собівартість деталі	грн.	412,813
4.	Собівартість товарної продукції цеху (C_{mn})	грн./рік	24768780
5.	Чисельність основних робітників	осіб	4
6.	Виробіток продукції на одного робітника	нормо-год./ос.	1805
7.	Матеріаломісткість продукції	%	85,5
8.	Зарплатомісткість продукції	%	2,1
9.	Зниження трудомісткості виготовлення деталі при впровадженні проектного варіанту техпроцесу ΔT_p	%	197,9

4.8. Висновки

З проведених розрахунків видно, що проектний варіант технологічного процесу виготовлення деталі корпус є більш економічно ефективним. Зниження трудомісткості виготовлення деталі при впровадженні проектного варіанту технологічного процесу становить 197,9%.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі на тему: «Розробка технології обробки корпусу із дослідженням процесу фрезерування» виконано дослідження процесу фрезерування та зосереджено увагу на фрезерній обробці отворів.

Проаналізовано особливості траєкторії руху інструменту під час фрезерування та розфрезерування отворів. Виконано аналіз відомих досліджень впливу режимів різання та сил різання на точність та якість обробки. Проаналізовано особливості конструкції різального інструменту для фрезерування отворів. Розглянуто процес стружкоутворення при фрезерній обробці отворів.

Виконано аналіз базового технологічного процесу обробки деталі корпус та виявлено його переваги та недоліки. Розроблено раціоналізований технологічний процес, який забезпечує скорочення кількості операцій механічної обробки, а відповідно, кількості та номенклатури металорізальних верстатів. Раціоналізація технологічного процесу передбачає скорочення часу на виготовлення деталі, зменшення кількості виробничих робітників та ін. При цьому, раціоналізований технологічний процес забезпечує якість та точність виготовленої за ним деталі, а також зниження собівартості виготовлення деталі. Розроблено рекомендації для обробки отворів деталі корпус із застосуванням розфрезерування методом гвинтової інтерполяції замість операцій розсвердлювання та розвертання. Також, для обробки площин, пазів та отворів рекомендовано обрати одну кінцеву фрезу, що забезпечить зменшення номенклатури застосованих для обробки деталі корпус різальних інструментів.

При розробці технологічного процесу вибрано заготовку, металорізальні верстати, затискні та вимірювальні пристрої. Розраховано режими різання та норми часу.

Виконано необхідні економічні розрахунки.

Всі прийняті технічні рішення підтверджено відповідними розрахунками.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Буц Б.Д. Розрахунок режимів різання / Б. Д. Буц, В. Є. Приходько, Ю. В. Ткачов // Навчальний посібник. – Д. РВВ ДНУ, 2005. – 76 с.
2. Вірич С.О. Застосування методу гвинтової інтерполяції при утворенні отворів на фрезерних верстатах із ЧПК / С.О. Вірич, М.О. Бабенко, О.М. Бова // Новітні технології в освіті, науці та виробництві: збірник матеріалів III Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції, 29-30 квітня 2021 р. – Покровськ: ДВНЗ «ДонНТУ», 2021. – С. 141-142.
3. Економічні та організаційно-планові розрахунки при проектуванні цеху механічної обробки. Методичні вказівки до виконання економічної частини дипломного проекту для студентів спеціальності 133 – «Галузеве машинобудування». / Укл. Журило І.В., Романюк Л.М. – Кропивницький: ЦНТУ, 2017. – 25 с.
4. Мазур М.П. Основи теорії різання матеріалів : підручник [для вищ. навч. закладів] / М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, А.І. Грабченко, В.Л. Доброскок, В.О. Залога, Ю.К. Новосьолов, Ф.Я. Якубов ; під заг. ред. М.П. Мазура. – 3-є вид. перероб. і доп. – Львів : Новий Світ-2000, 2020. – 471 с.
5. Методичні рекомендації до кваліфікаційної роботи : освітньо - професійна програма «Прикладна механіка», рівень вищої освіти другий (магістерський) : спец. 131 Прикладна механіка, галузь знань 13 Механічна інженерія / [уклад. : І. І. Павленко, В. А. Мажара, К. К. Щербина, О. І. Скібінський] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т., каф. машинобуд., мехатроніки і робототехніки. - Кропивницький : ЦНТУ, 2021. - 42 с.
6. Технологія машинобудування : метод. вказ. до викон. курсового проекту : для студ. спец. «Прикладна механіка», «Галузеве машинобудування» / [уклад. : І. І. Павленко, А. М. Артюхов, М. М. Підгаєцький та ін.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т, каф. технології машинобудування. – Кропивницький : ЦНТУ, 2018. – 68 с.
7. Adhikari R. Machinability and surface integrity investigation during helical hole milling in AZ31 magnesium alloy / R. Adhikari, G. Bolar, R. Shanmugam, U. Koklu

- // International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. – 2023. – Vol. 6. – P. 149-164.
8. Amini S. Enhancing dimensional accuracy and surface integrity by helical milling of carbon fiber reinforced polymers / S. Amini, M. Baraheni, E. Hakimi // International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. – 2019. – Vol. 2. – P; 362-372.
 9. Barman A. Evaluation of conventional drilling and helical milling for processing of holes in titanium alloy Ti6Al4V / A. Barman, R. Adhikari, G. Bolar // Materials Today: Proceedings. 2020. P. 1–6.
 10. Bolar G. Drilling and helical milling for hole making in multi-material carbon reinforced aluminum laminates / G. Bolar, A. K. Sridhar, A. Ranjan // International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. – 2022. – Vol. 5. – P. 113-125.
 11. Changyi L. Mechanics and Dynamics of Helical Milling Operations / L. Changyi, G. Wang, M. S. Dargusch // Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering. – 2014. – Vol. 60. – Issue 11. – P. 716-724.
 12. Denkena B. Helical milling of CFRP–titanium layer compounds / Denkena B., Boehnke D., Dege J.H. // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2008. – Vol. 1. – P. 64–69.
 13. Deshpandea S. Data maps for material identification in helical milling by spindle power monitoring / S. Deshpandea, A. Bouzida, P. Lagarriguea, Y. Landona, A. Carla Araujo // 19th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations. – 2023. P. 1-6.
 14. Fernández-Vidala S.R. Analysis of the effects of tool wear on dry helical milling of Ti6Al4V alloy / S.R. Fernández-Vidala, P. Mayueta, A. Riverob, J. Salgueroa, I. del Sola, M. Marcosa // The Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC. Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 132. – P. 593-599.
 15. Ge1 J. Investigating hole making performance of Al 2024-T3/Ti-6Al-4V alloy stacks: A comparative study of conventional drilling, peck drilling and helical milling / J. Ge1, R. Reji, T. Feist, A. Elmore, J. McClelland, C. Higgins, B. McLaughlin, Y. Jin, D. Sun // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2022. – Vol. 120. – P. 5027–5040.

- 16.Heuwinkel M. As Easy as X, Y, Z / M. Heuwinkel // CUTTING TOOL ENGINEERING Magazine. – 2008. – Vol. 58. – Issue 8. – P. 2.
- 17.Kharka V. Study on Helical Milling of SS 304 with Small Diameter Tools under the Influence of Minimum Quantity Lubrication (MQL) / V. Kharka, S. Mujumdar, Sh. Shukla // Manufacturing Letters: 51st SME North American Manufacturing Research Conference (NAMRC). – 2023. – Vol.35. – P. 1312-1317.
- 18.Li Z. Cutting force modeling and simulation for hole-making operation by helical milling / Z. Li, Q. Liu, C. Peng, X. Sun // Fourth International Seminar on Modern Cutting and Measurement Engineering. – Vol. 7997. – P. 6.
- 19.Qin X.D. Comparative Study on Helical Milling and Drilling of Ti-6Al-4V / X.D. Qin, X.T. Sun, Q. Wang, S.M. Chen, H. Li1 // Trans Tech Publications, Switzerland: 2012. – P. 1-6.
- 20.Tian Y. Simulation of surface morphology and roughness during helical milling / Y. Tian, Y. Zhou, F. Wang, Y. Liu, D. Zhang // Euspen's 17 th International Conference & Exhibition, Hannover, DE. – 2017. – P. 2.
- 21.Zhongqunab L. Cutting force modeling and simulation for hole-making operation by helical milling / L. Zhongqunab, L. Qiangb, P. Chongb, S. Xiaoa // Fourth International Seminar on Modern Cutting and Measurement Engineering. – 2011. – Vol. 7997. – P. 1-6.