

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
і.м. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ
КАФЕДРА КОНСТРУЮВАННЯ МАШИН

До захисту допущено

Завідувач кафедри

Юрій ДАНИЛЬЧЕНКО

(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” _____ 2025 р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Конструювання та дизайн машин»

спеціальності 131 «Прикладна механіка»

на тему: «Фреза кінцева для оброблення алюмінієвого сплаву»

Виконав студент групи

IV курсу, групи МІ-12

Ляшук Вероніка Русланівна

(прізвище ім'я по батькові)

(підпис)

Керівник

Парненко Валерія Сергіївна

(вчена ступінь та звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

РЕЦЕНЗЕНТ:

_____ (посада, наукова ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

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

Студент _____

(підпис)

Київ -2025

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут
ім. Ігоря Сікорського”
Навчально-науковий Механіко-машинобудівний інститут
Кафедра конструювання машин

Рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____

Спеціальність _____ **131 Прикладна механіка** _____

(код і назва)

Освітньо-професійна програма _____ **«Конструювання та дизайн машин»** _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Юрій ДАНИЛЬЧЕНКО

(підпис) (ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 202_ р.

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ СТУДЕНТУ

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту _____

керівник проекту _____

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від “ _____ ” _____ **202 року №**

2. Термін подання студентом проекту _____

3. Вихідні дані до проекту _____

4. Зміст пояснювальної записки _____

РЕФЕРАТ

Метою дипломного проєкту є розробка конструкції збірної кінцевої фрези для високошвидкісної обробки алюмінієвих сплавів, яка забезпечує високу точність, продуктивність та довговічність інструменту. Актуальність теми обумовлена широким використанням алюмінієвих матеріалів в авіаційній, транспортній і машинобудівній галузях, а також специфічними труднощами їх обробки — високою пластичністю, теплопровідністю та схильністю до налипання стружки.

У дипломному проєкті проведено аналіз властивостей алюмінієвих сплавів, досліджено особливості процесу фрезерування, вивчено сучасні конструкції кінцевих фрез, геометричні параметри, матеріали для різальних елементів, а також проведено патентний аналіз аналогічних інструментів.

Створено 3D-модель фрези кінцевої, розроблено технологію її виготовлення, включно з вибором режимів різання, припусків, побудовою керуючої програми для ЧПК та розрахунком напружено-деформованого стану. Також спроектовано контрольно-вимірювальне пристосування.

Розроблена конструкція забезпечує зниження собівартості обробки, підвищення якості обробленої поверхні та зменшення експлуатаційних витрат в умовах серійного виробництва.

Ключові слова: кінцева фреза, алюмінієвий сплав, високошвидкісне фрезерування, САD-модель, технологія виготовлення, ЧПК, збірна конструкція.

ABSTRACT

The purpose of the diploma project is to develop a design of a prefabricated end mill for high-speed machining of aluminum alloys, which provides high accuracy, productivity and durability of the tool. The relevance of the topic is due to the widespread use of aluminum materials in the aviation, transport and mechanical engineering industries, as well as the specific difficulties of their processing - high plasticity, thermal conductivity and tendency to chip sticking.

The diploma project analyzed the properties of aluminum alloys, investigated the features of the milling process, studied modern designs of end mills, geometric parameters, materials for cutting elements, and also conducted a patent analysis of similar tools.

A 3D model of the end mill was created, the technology of its manufacture was developed, including the selection of cutting modes, allowances, construction of a control program for CNC and calculation of the stress-strain state. A control and measuring device was also designed.

The developed design provides a reduction in processing costs, an increase in the quality of the processed surface and a reduction in operating costs in serial production.

Keywords: end mill, aluminum alloy, high-speed milling, CAD model, manufacturing technology, CNC, prefabricated structure.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 РОЗГЛЯД І АНАЛІЗ ПИТАНЬ ОБРОБКИ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ КІНЦЕВОЮ ФРЕЗОЮ.....	10
1.1 Вихідні дані для проектування.....	10
1.2 Властивості алюмінієвих сплавів, що застосовуються в авіаційній промисловості.....	11
1.3 Особливості обробки алюмінію фрезеруванням.....	13
1.4 Аналіз сучасних конструкцій кінцевих фрез	16
1.4.1 Огляд матеріалів пластин для оброблювання алюмінієвих сплавів.....	24
1.4.2 Особливості геометрії пластин для оброблювання алюмінієвих сплавів.....	26
1.5 Геометричні параметри фрез для обробки кольорових металів.....	29
1.6 Порівняння фрез за каталогами провідних виробників.....	32
Висновки за розділом.....	36
2 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА.....	38
2.1 Обґрунтування вибору типу фрези.....	38
2.2 Вибір матеріалів для різальних елементів та корпусу.....	39
2.3 Конструкція збірної кінцевої фрези.....	41
2.4 Побудова моделі інструмента в САД-середовищі.....	44
Висновки за розділом.....	50
3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	51
3.1 Технологічний процес виготовлення корпусу фрези.....	51
3.2 Розрахунок припусків на обробку.....	59
3.3 Розрахунок режимів різання технологічної операції.....	66
3.4 Визначення зміщення осі гвинта відносно осі різальної пластинки.....	72
3.5 Розробка керуючої програми для обробки фрези на верстаті з ЧПК.....	77
Висновки за розділом.....	84
4 ВЕРСТАТНІ ПРИСТОСУВАННЯ ДЛЯ ЗБІРКИ ТА ВИМІРЮВАНЬ.....	86

4.1 Контрольно-вимірювальні пристосування.....	86
4.2 Проектування складального оснащення.....	88
Висновки за розділом.....	91
5 АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ.....	93
5.1 Розрахунок сили різання.....	93
5.2 Розрахунок напружено-деформованого стану.....	96
ВИСНОВКИ.....	101
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	102
Додаток А. Конструкція фрези.....	106
Додаток Б. 3D-модель інструмента.....	107
Додаток В. Складані креслення.....	108
Додаток Г. Технологічна документація.....	110
Додаток І. Керуюча програма для ЧПК.....	121
Додаток Д. Креслення пристосувань.....	122

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку машинобудування особливу роль відіграють технології високошвидкісної обробки, що дозволяють значно підвищити продуктивність, зменшити цикл виготовлення деталі та забезпечити високу якість обробленої поверхні. Одним із матеріалів, який широко використовується в авіаційній, транспортній та приладобудівній галузях, є алюміній та його сплави. Вони вирізняються низькою густиною, високою питомою міцністю, добрими антикорозійними властивостями, а також чудовою оброблюваністю.

Проте при всіх перевагах обробка алюмінієвих сплавів має низку технологічних складнощів. Зокрема, при фрезеруванні виникають проблеми, пов'язані з налипанням стружки на різальну кромку, перегрівом інструменту, утворенням задирок, що ускладнює забезпечення стабільної точності та чистоти поверхні. Для мінімізації цих явищ розробляються спеціалізовані кінцеві фрези, конструкція яких повинна враховувати фізико-механічні особливості алюмінію.

Кінцева фреза є універсальним інструментом для обробки пазів, уступів, площини та складних профілів. Її ефективність безпосередньо залежить від матеріалу, геометрії різальної частини, кількості зубців, покриття та конструктивних рішень у частині кріплення елементів. Для досягнення результату у високошвидкісній обробці необхідно проектувати фрезу, яка відповідатиме вимогам не лише до точності, але й до зносостійкості, жорсткості та технологічності виготовлення.

Актуальність обраної теми зумовлена потребою у створенні збірної кінцевої фрези, яка здатна працювати в умовах високих навантажень при обробці алюмінієвих сплавів. У межах роботи буде розглянуто технологічні, конструктивні та розрахункові аспекти проектування фрези, здійснено аналіз існуючих рішень, проведено моделювання, а також обґрунтовано доцільність вибору основних параметрів інструмента.

Мета дипломного проекту полягає у розробці конструкції збірної кінцевої фрези для обробки алюмінієвих деталей з урахуванням вимог високошвидкісної

обробки. Об'єктом дослідження є процес фрезерування алюмінієвих сплавів, а предметом — конструкція інструменту та його режими роботи. Методологічною основою слугує аналіз літературних джерел, патентної бази, каталогів виробників, а також моделювання в CAD/CAM середовищах та розрахунок основних технологічних параметрів.

Запропонована конструкція буде орієнтована на обробку внутрішніх кишень, уступів та інших елементів у деталях з алюмінію з метою підвищення продуктивності та зниження собівартості виготовлення продукції в умовах серійного виробництва.

1. РОЗГЛЯД І АНАЛІЗ ПИТАНЬ ОБРОБКИ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ КІНЦЕВОЮ ФРЕЗОЮ

1.1 Вихідні дані для проектування

Проектування інструменту для обробки алюмінієвих сплавів починається з формулювання вихідних вимог, які ґрунтуються на особливостях матеріалу, умовах виробництва та типі деталей, що підлягають обробці. У цьому дипломному проекті передбачається обробка деталей типу «кишеня» і «внутрішній уступ», що характерні для корпусних елементів з алюмінієвих сплавів. Оброблюваний матеріал належить до групи деформованих алюмінієвих сплавів групи 7xxx за класифікацією Aluminum Association (відповідають серії 7xxx за AA/ISO 209-1), що вирізняються високою міцністю та відносно добрими характеристиками різання. Матеріал має щільність близько $2,7 \text{ г/см}^3$, твердість у діапазоні 100–140 НВ, високу теплопровідність та виражену схильність до злипання зі сталевим різальним інструментом при підвищеній температурі. Для фрезерування буде використовуватись вертикальний фрезерний обробний центр із ЧПК, з можливістю досягнення швидкості обертання шпинделя до 18000 об/хв і подачею МОТС як зовнішньою, так і внутрішньою. Вимоги до інструменту зумовлені як фізичними властивостями оброблюваного матеріалу, так і умовами обробки. Кінцева фреза повинна мати діаметр 12–16 мм, бути збірною, з корпусом із конструкційної сталі або алюмінієвого сплаву, та змінними твердосплавними пластинами. Для запобігання налипанню бажано використовувати дзеркально поліровані канавки або покриття на кшталт TiB₂. Конструкція має забезпечувати можливість повторного використання корпусу після зношування пластин. Вихідними даними також є вимоги до точності обробки — до IT8 — та до параметра шорсткості Ra не гірше 1,6 мкм. Ці умови стануть базовими при подальшому конструюванні фрези та підборі її геометричних параметрів.

1.2 Властивості алюмінієвих сплавів, що застосовуються в авіаційній промисловості

Алюмінієві сплави — це один із ключових конструкційних матеріалів у сучасному авіабудуванні, завдяки поєднанню високої питомої міцності, доброї оброблюваності, малої густини ($\approx 2,7 \text{ г/см}^3$), корозійної стійкості та легкості формоутворення. Вони становлять основу для виготовлення несучих елементів планера, обшивки, лонжеронів, ребр, перегородок, елементів кріплення, що працюють під змінними навантаженнями.

Згідно з класифікацією, визначеною у ДСТУ EN 573-1:2017 та міжнародному стандарті ISO 209-1:2007, алюмінієві сплави умовно поділяються на серії за хімічним складом. Зокрема, до найпоширеніших деформованих сплавів належать серії 2xxx (основа — мідь), 6xxx (магній + кремній) і 7xxx (цинк). Сплави серії 2xxx, зокрема 2024-T3, характеризуються високою міцністю (границя міцності $\approx 470 \text{ МПа}$), але потребують антикорозійного захисту. 6xxx (6061-T6) — мають добру зварюваність і корозійну стійкість, проте поступаються за міцністю. Найбільше застосування у відповідальних конструкціях мають сплави серії 7xxx — особливо 7075-T6, де границя міцності сягає 530–580 МПа при відносно високій твердості (до 150 НВ)

Алюмінієві сплави мають високу теплопровідність (180–210 Вт/м·К), що сприяє інтенсивному відведенню тепла із зони різання, але у той же час підвищує теплове навантаження на різальний інструмент. Низька температура плавлення ($\approx 660 \text{ }^\circ\text{C}$), висока пластичність і хімічна активність призводять до налипання стружки на різальну кромку, що викликає нестабільність процесу, зниження якості обробки та швидкий знос інструменту. Це особливо критично при високошвидкісному фрезеруванні, де температура в зоні контакту досягає 300–400 $^\circ\text{C}$

При фрезеруванні алюмінію важливо забезпечити гостру різальну кромку, позитивний передній кут (10–20 $^\circ$), дзеркально відполіровані канавки для вільного виносу стружки, а також покриття, що зменшують адгезію (TiB₂, DLC).

Застосування сплавів з підвищеним вмістом цинку і магнію, таких як 7475, забезпечує додаткову жорсткість і стабільність форми після обробки, що критично для тонкостінних і прецизійних авіаційних деталей.

Характерною властивістю авіаційних сплавів є піддатливість до термічного зміцнення. Це дозволяє досягати високих показників твердості та міцності без істотного зниження оброблюваності. Наприклад, сплав 2024 у стані Т3 добре піддається фрезеруванню, тоді як 7075-Т6 — більш твердий, але схильний до утворення задирок при недостатньому змащуванні або неправильному виборі інструменту.

У таблиці 1.1 нижче представлено порівняльну характеристику найбільш вживаних алюмінієвих сплавів для фрезерування [9]:

Таблиця 1.1 - Порівняльна характеристика алюмінієвих сплавів, що застосовуються для фрезерування [9]

Позначення сплаву	Система легування	Густина, г/см ³	Міцність на розрив, МПа	Оброблюваність	Особливості застосування
EN AW-6082	Al-Mg-Si	2,7	300–350	Висока	Конструкції, транспорт, загальне призначення
EN AW-7075	Al-Zn-Mg-Cu	2,81	до 550	Середня	Аерокосмічна галузь
EN AW-2024	Al-Cu-Mg	2,78	450	Низька	Авіація, навантажені деталі
EN AW-5083	Al-Mg	2,66	275	Висока	Морський транспорт, суднобудування

Таким чином, особливості алюмінієвих сплавів вимагають комплексного підходу при проектуванні інструменту: потрібно враховувати теплофізичні характеристики, в'язкість, механічну міцність та чутливість до нагрівання. Саме на цих властивостях базуються ключові вимоги до геометрії кінцевих фрез, матеріалу пластин та технологічних режимів обробки.

1.3 Особливості обробки алюмінію фрезеруванням

Фрезерування алюмінієвих сплавів є однією з найпоширеніших операцій у серійному та високоточному виробництві. Незважаючи на загальну добру оброблюваність алюмінію, його фізико-механічні властивості висувають ряд вимог до інструменту. Серед головних труднощів — висока пластичність, низька температура плавлення (~ 660 °C), схильність до налипання стружки на різальну кромку, утворення задирок та перегрів у зоні різання. В умовах високошвидкісної обробки (HSM) ці чинники особливо критичні, тому вибір фрези має базуватися на ретельному аналізі її конструктивних і геометричних параметрів.

Для забезпечення ефективності, точності та довговічності інструмента доцільним є використання збірних кінцевих фрез, які дозволяють змінювати лише різальну частину при збереженні корпусу. Це не лише знижує експлуатаційні витрати, а й дозволяє адаптувати інструмент до різних умов обробки та швидко реагувати на знос різальних елементів. Особливо це актуально при обробці тонкостінних корпусних деталей типу «кишеня», «внутрішній уступ», «фланець» з алюмінієвих сплавів, що використовуються в авіаційній і транспортній галузі.

Одним із прикладів збірної кінцевої фрези для обробки алюмінію є Sandvik CoroMill 316 [2]. Це модульний інструмент, який складається з державки та змінної різальної головки з твердого сплаву. Для алюмінію застосовуються головки зі збільшеним переднім кутом (до $+20^\circ$), полірованими канавками та оптимізованою геометрією, що сприяє ефективному виносу стружки. Така фреза дозволяє виконувати обробку з високою швидкістю обертання (до 25 000 об/хв) та забезпечує точність на рівні IT8. Завдяки конструкції, що допускає повторне використання державки, інструмент є економічно вигідним у серійному виробництві. Фрези Sandvik серії CoroMill Plura HFS [1] або модульні CoroMill 316 [2] мають позитивні кути різання ($\gamma = +12\dots 20^\circ$) і використовуються без покриття або з антифрикційним шаром.



Рисунок 1.1 - Sandvik CoroMill Plura HFS для бокового фрезерування та обробки кишень (Endustri – dunyasi) [1]



Рисунок 1.2 - Sandvik CoroMill 316 (The Engineer) [2]

Ще одним прикладом збірної кінцевої фрези є Walter M4575 із серії M4000 [3], призначена для обробки алюмінієвих сплавів. Вона має модульну конструкцію, циліндричну державку та змінні багатогранні пластини. Геометрія пластин оптимізована для кольорових металів — передбачено позитивний

передній кут, велике стружкове канавлення та високу стійкість до налипання. Інструмент придатний до роботи в умовах HSM із мінімальним охолодженням або MQL [3].



Рисунок 1.3 - Walter M4575 з серії M4000 (Walter – tools) [3]

До сучасних рішень також належить ISCAR MULTI-MASTER [4] — система збірних модульних фрез з різьбовим з'єднанням між державкою та різальною головкою. Така конструкція дозволяє швидку заміну головки без демонтажу державки з інструментального тримача. Для обробки алюмінію використовуються головки з 2–3 зубцями, великим кутом нахилу спіралі (до 45°) та полірованими канавками. Геометрія інструмента зменшує теплове навантаження та сили різання, що важливо для обробки тонкостінних елементів. MULTI-MASTER забезпечує високу повторюваність та стійкість при HSM завдяки точності з'єднання та можливості внутрішньої подачі повітря або MQL[4].



Рисунок 1.4 – Метод кріплення ISCAR MULTI-MASTER (Form + Werkzeug) [4]

У всіх наведених прикладах особливу увагу приділено наступним параметрам фрез, важливим для ефективної обробки алюмінію:

- Передній кут $\gamma = +10\dots+20^\circ$ — для зменшення опору різанню;
- Задній кут $\alpha = 10\text{--}14^\circ$ — для зниження тертя;
- Кут нахилу спіралі $\lambda = 30\text{--}45^\circ$ — для полегшення виносу стружки;
- Мала кількість зубців (2–3) — для зменшення налипання та перегріву;
- Поліровані канавки — для зменшення тертя й адгезії;
- Гостра кромка без фаски — для уникнення задирок при чистовій обробці;

1.4 Аналіз сучасних конструкцій кінцевих фрез

Аналіз патентної документації є важливою складовою інженерного проектування, що дозволяє враховувати вже реалізовані технічні рішення,

уникати їх дублювання та базувати власну розробку на перевірених практиках. У сфері інструментального виробництва, зокрема кінцевих фрез для обробки алюмінієвих сплавів, відзначається значна кількість запатентованих конструкцій, які реалізують різноманітні підходи до забезпечення точності, стійкості та продуктивності інструмента.

Одним з прикладів технічного рішення, орієнтованого на високоефективну обробку алюмінію, є патент US6655880B2 [5], у якому описано конструкцію кінцевої фрези з дзеркально полірованими різальними кромками. Така геометрія дозволяє мінімізувати налипання алюмінію, що є типовою проблемою при його обробці, та зменшити утворення задирок. Особливістю запропонованої конструкції є плавний перехід між різальною частиною та шийкою фрези, що дозволяє зменшити вібраційні навантаження і тим самим підвищити точність обробки[5].

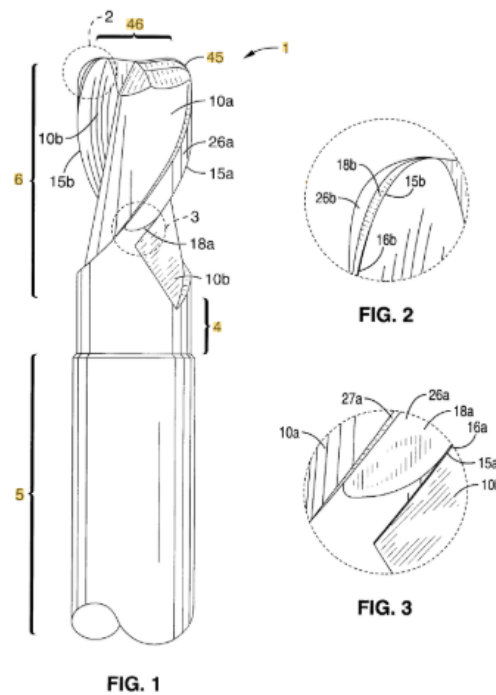


Рисунок 1.5 - Кінцева фреза [5]

Іншим цікавим прикладом є патент US20060067797A1 [6], де представлено фрезу зі змінною шириною полицки (margin) та варіативною глибиною зуба. Це технічне рішення дозволяє рівномірно розподіляти навантаження вздовж різальної кромки, що критично важливо при обробці алюмінію в умовах

високошвидкісного фрезерування. Застосування змінної геометрії сприяє зменшенню зношення, забезпечує стабільнішу роботу інструменту та дозволяє досягти більшої повторюваності при обробці серійних деталей [6].

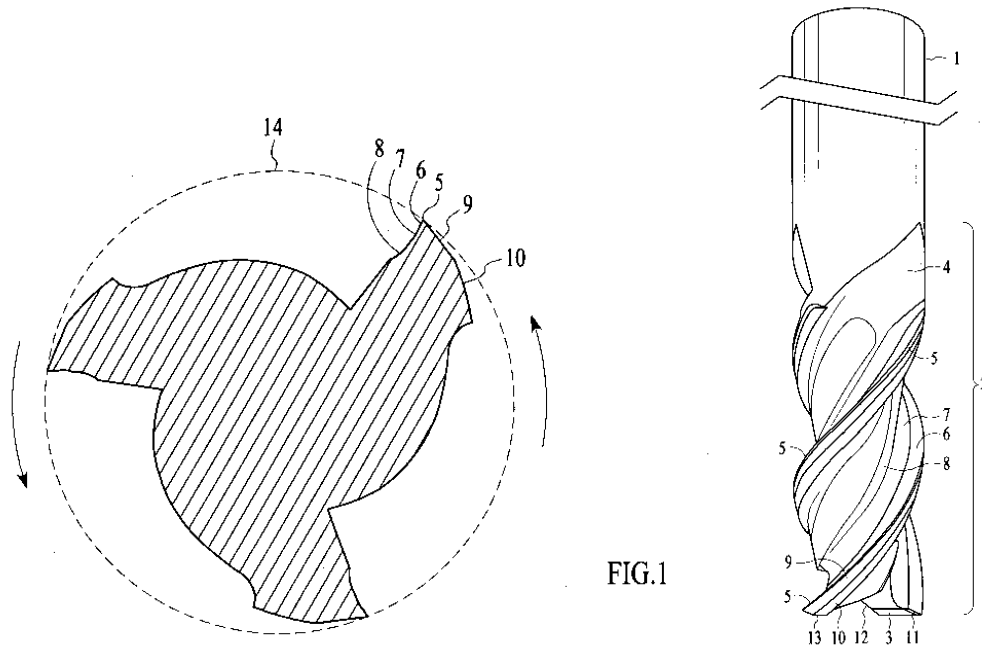


Рисунок 1.6 - Кінцева фреза із периферійним краєм [6]

Окрему увагу заслуговує підхід, що реалізований у патенті US20050186044A1. У ньому запропоновано конструкцію інструмента, придатного для обробки біметалевих заготовок, де алюміній поєднується з чавуном або сталлю. Це складне завдання, оскільки різні частини заготовки мають різні механічні характеристики. Згідно з патентом, фреза оснащується керамічними вставками на основі нітриду кремнію, що дозволяє стабільно працювати по обох матеріалах без критичного зносу кромки. Це рішення має особливу цінність для авіаційної галузі, де часто використовуються багатошарові або комбіновані конструкції з алюмінієвими оболонками та металевими армованими елементами.

Варто зазначити, що низка рішень, які подані у відкритих патентах, уже реалізовані на практиці у вигляді конкретних продуктивних лінійок провідних виробників інструменту. Наприклад, компанія Kennametal у патенті US7909545

розробила фрезу з напайними кульовими сегментами із надтвердих матеріалів, спеціально адаптовану до обробки алюмінію та інших кольорових металів. Ця фреза має полегшений корпус, оптимізований для обертання на високих частотах, що дозволяє ефективно реалізувати концепцію високошвидкісного фрезерування (High-Speed Machining, HSM).

На особливу увагу заслуговує конструкція фрези AeroMill-Plus, представлена компанією Korloy у вигляді серії APD(M)-PB, яка широко використовується для високошвидкісної обробки алюмінієвих сплавів. Особливістю цієї фрези є її змінні картриджі, оснащені полікристалічними алмазними пластинами (PCD). Такий підхід дозволяє з одного боку забезпечити виняткову стійкість до зношування, а з іншого – зменшити масу фрези шляхом використання алюмінієвого корпусу. Подібна реалізація має переваги у вигляді зменшення вібрацій, полегшення навантаження на шпиндель та підвищення частоти обертання, що особливо важливо у фрезерних верстатах з ЧПК.

Інші реалізації патентних ідей фіксуються у фрезах серій Octomill від Seco, де застосовано восьмигранні пластини з регульованим кріпленням у касетному тримачі. Такий конструктив дозволяє зменшити витрати на інструмент за рахунок багаторазового використання різальних кромek, а також адаптувати фрезу до конкретного матеріалу завдяки зміні типу та розташування пластин.

В результаті аналізу серед великої кількості патентів особливо виділяються два документи: US9643262B2 [7] та US9643264B2 [8], що належать до системи Duo-Lock, запатентованої компанією Kennametal Inc.. Ці патенти описують конструкцію збірної кінцевої фрези, яка складається з окремої різальної головки та тримача. Така конструкція забезпечує високу жорсткість і стабільну співвісність після багаторазового знімання та встановлення головки.

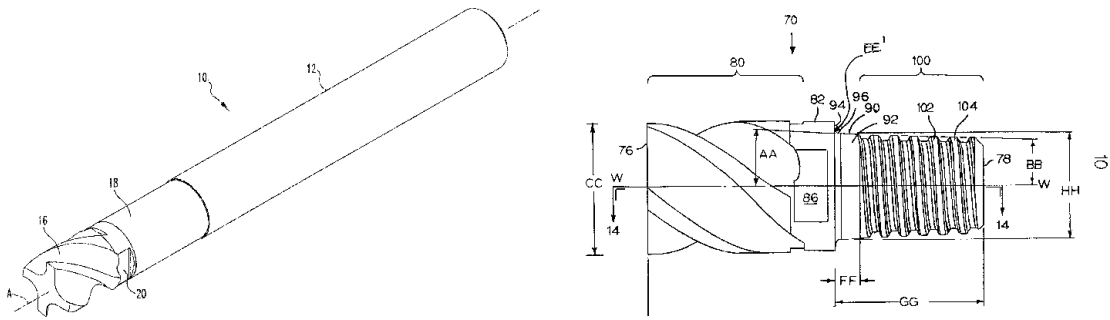


Рисунок 1.7 - Зчіпний механізм для різального інструменту (Modular tool interface (Duo-Lock)) [7]

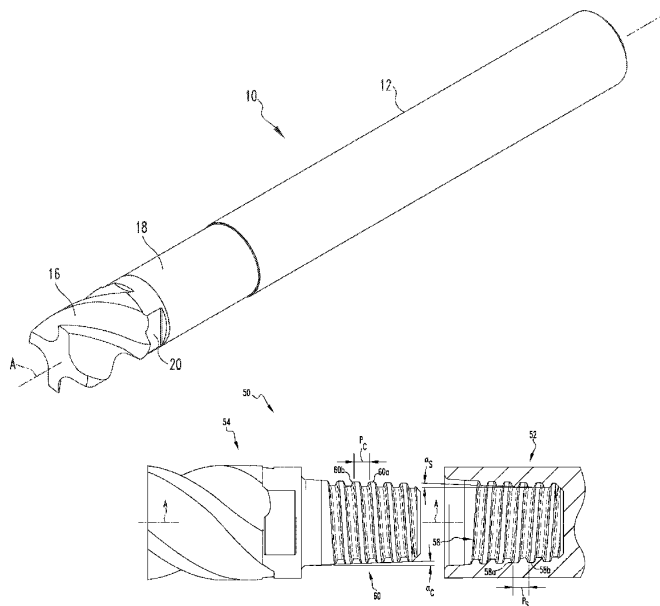


Рисунок 1.8 - Зчіпний механізм для різального інструменту (Modular rotary cutting tool system) [8]

Механізм Duo-Lock поєднує зручність швидкої заміни різальної частини з характеристиками, притаманними монолітному інструменту: високою точністю, відсутністю биття та здатністю до роботи на високих обертах. Це дозволяє ефективно використовувати фрезу при обробці алюмінієвих деталей, де особливо важливо уникати вібрацій, перегріву та дефектів на поверхні.

В патентній документації зазначено, що система Duo-Lock орієнтована на високошвидкісну обробку кольорових металів, включаючи алюмінієві сплави,

які потребують особливої геометрії інструмента. Модульна система також дозволяє використовувати головки різного діаметру з одним і тим самим тримачем, що економічно вигідно та технологічно доцільно в умовах дрібносерійного виробництва чи швидкої переналадки верстата.

На основі конструкції Duo-Lock реалізовані численні фрези серій Power Mill ALU, HARVI Ultra ALU, Duo-Lock ALU, які широко представлені в каталогах WIDIA, Haimer, Kennametal. Вони мають геометрію, оптимізовану для алюмінію: збільшений передній кут, дво- або тризубу конструкцію, дзеркально поліровані канавки та іноді антипригарне покриття DLC. Усе це відповідає вимогам до геометрії кінцевих фрез для м'яких сплавів.

Враховуючи вищезазначене, система Duo-Lock, захищена патентами US9643262B2 [7] та US9643264B2 [8], є технічно обґрунтованим зразком збірної кінцевої фрези для обробки алюмінію. Вона може бути використана як прототип або ідейна основа для подальшого проектування власної конструкції, адаптованої до конкретних умов виробництва та експлуатації.

Таким чином, патентна документація у сфері конструкції кінцевих фрез для обробки алюмінію відображає широкий спектр інженерних підходів: від оптимізації геометрії до використання нових матеріалів. Усі ці рішення спрямовані на підвищення стабільності процесу різання, зниження зносу інструменту, забезпечення точності та чистоти обробки, що має вирішальне значення в умовах високошвидкісного та високопродуктивного виробництва.

Щоб розробити власну кінцеву збірну фрезу для високошвидкісної обробки алюмінієвих сплавів, спочатку потрібно вивчити існуючі конструкції подібних інструментів. Це дозволяє зрозуміти, які технічні рішення вже використовуються у промисловості, які з них ефективні, а які — ні, і що саме з цього можна застосувати у власному проекті.

Збірні кінцеві фрези мають важливу перевагу перед монолітними — можливість заміни тільки різальної частини або пластин при збереженні корпусу. Це дозволяє зменшити витрати на інструмент і час простою обладнання, що особливо актуально для серійного виробництва.

Першою варто розглянути систему Sandvik CoroMill 316 [2]. Це модульна фреза, де різальна головка прикручується до державки через різьбове з'єднання. Головки, призначені для алюмінію, мають 2–3 зубці, дзеркально поліровані канавки та позитивний передній кут. Така геометрія знижує опір різанню, покращує видалення стружки і дозволяє працювати на обертах до 25 000 об/хв. Крім того, ця система зручна в експлуатації та легко адаптується до різних умов обробки [2].

Наступний приклад — Walter M4575 з серії M4000 [3]. Це збірна фреза з корпусом циліндричної форми та змінними пластинами. Вона спеціально розроблена для легких металів і має геометрію пластин, яка забезпечує якісне різання при HSM. Пластини встановлюються точно. В цілому, ця конструкція дозволяє досягти високої стабільності та точності під час обробки алюмінієвих деталей [3].

Ще одна система, яка варта уваги — ISCAR MULTI-MASTER [4]. Це також модульна фреза зі змінною головкою, яка кріпиться до державки різьбовим з'єднанням. Для алюмінію використовуються головки з полірованими канавками та геометрією, яка зменшує сили різання. Головною перевагою цієї фрези становить гнучкість — один корпус підходить до багатьох типів головок, а їх заміна займає лічені хвилини [4].

Важливим елементом конструкції збірної фрези є тип кріплення пластин:

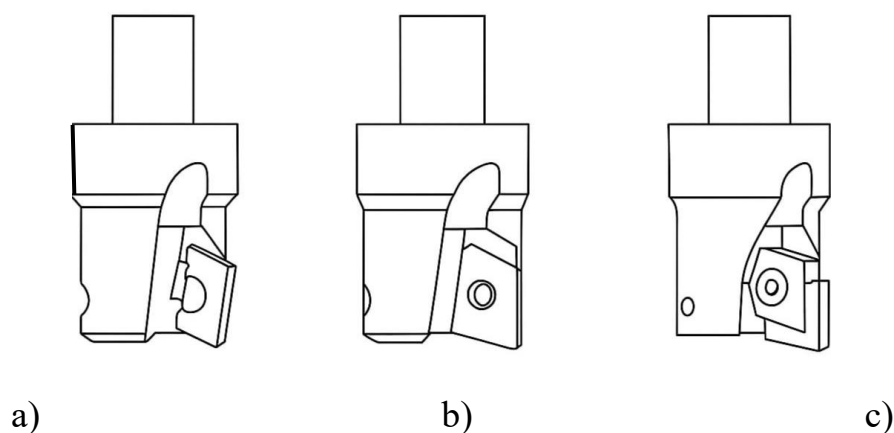


Рисунок 1.9 - Тип кріплення пластин

- a) прихватом (тип C);
- b) гвинтом у центральному отворі (тип S);
- c) касетно-гвинтовим способом з можливістю осьового регулювання (переважно для точного позиціонування при чистовій обробці)

Таким чином, сучасні конструкції кінцевих фрез для алюмінію орієнтовані на:

- зменшення маси (через алюмінієві корпуси),
- простоту заміни різальних елементів (збірні касетні рішення),
- можливість високошвидкісної обробки (зменшення вібрацій),
- забезпечення високої якості обробленої поверхні при мінімальній подачі.

Оскільки цільні фрези використовуються для дрібносерійного або високоточного фрезерування а збірні для масової обробки з високими вимогами до економічності, то саме збірна фреза буде найкращим вибором для обробки алюмінієвих сплавів для заданих умов виробництва.

Після аналізу цих конструкцій можна виділити кілька рішень, які доцільно використати при розробці власної кінцевої збірної фрези:

- різьбове з'єднання або система кріплення пластин повинна забезпечувати точність і жорсткість;
- позитивна геометрія різальної частини (великий передній кут, 2–3 зубці);
- поліровані канавки для кращого відведення стружки;
- легкий, але жорсткий корпус;
- підтримка системи MQL або повітряного охолодження.

На основі цього аналізу будуть сформовані основні конструктивні рішення мого інструменту, які максимально відповідатимуть умовам високошвидкісної обробки алюмінієвих деталей.

Ще одним важливим напрямом є модульні фрези. Наприклад, у фрезах з'єднання виконано на основі різьбової або конусної посадки, що дає змогу замінювати різальну частину без повного демонтажу інструменту. Це пришвидшує обслуговування і забезпечує гнучкість при використанні фрез різного діаметра або типу пластин.

Також важливою є система охолодження. Замість традиційного подавання МО часто застосовується повітряне охолодження або MQL, оскільки надмірна рідина при високих обертах може створювати турбулентність та "термічний шок". У збірних фрезах сучасних конструкцій передбачені внутрішні канали для подачі повітря або масляного туману, що підвищує стабільність роботи інструмента.

Такі характеристики дають змогу застосовувати високошвидкісне фрезерування (HSM) з обертами понад 20 000 об/хв. Для алюмінію це особливо ефективно, оскільки значна частина тепла виноситься стружкою, а малі сили різання дозволяють зменшити вібрації та підвищити якість поверхні.

Таким чином, ефективність фрезерування алюмінієвих сплавів на сучасних ЧПК-верстатах безпосередньо залежить від конструктивних рішень, реалізованих у збірних кінцевих фрезах. Їх оптимізована геометрія, модульна структура та можливість точної адаптації до умов обробки забезпечують високу продуктивність, якість поверхні та тривалий ресурс інструмента в умовах серійного або масового виробництва.

1.4.1 Огляд матеріалів пластин для оброблювання алюмінієвих сплавів

Алюмінієві сплави широко використовуються в авіаційній, автомобільній та електронній промисловості завдяки своїй легкості, високій теплопровідності та корозійній стійкості [10]. Проте їх обробка має певні труднощі, зокрема утворення налипань на різальному інструменті та утворення задирок [11]. Тому вибір матеріалу для різальних пластин є критично важливим для забезпечення ефективної обробки алюмінієвих сплавів [12].

Основні матеріали пластин для обробки алюмінієвих сплавів

1. Твердосплавні пластини (WC-Co)

Твердосплавні пластини, виготовлені з карбіду вольфраму з кобальтовим зв'язуючим, є найпоширенішими для обробки алюмінієвих сплавів [12] [13]. Вони забезпечують високу зносостійкість та термостійкість, що дозволяє

працювати на високих швидкостях різання. Наприклад, пластина APGT1605PDER-G2 K20 призначена для обробки алюмінієвих, мідних сплавів та пластиків, що мають високу в'язкість. Сплав дозволяє працювати з ударом і має рекомендовані режими обробки: глибина за прохід 0,50–2,00–8,00 мм; подача на зуб 0,10–0,20–0,35 мм/зуб; швидкість різання 100–150–250 м/хв [14].

2. Полікристалічний алмаз (PCD)

Пластини з полікристалічного алмазу (PCD) використовуються для високошвидкісної обробки алюмінію [15]. Вони забезпечують відмінну якість поверхні та тривалий термін служби інструменту. Компанія Tungaloy пропонує PCD-пластини, які дозволяють працювати на надзвичайно високих швидкостях різання. Для забезпечення стабільності процесу при високих обертах, Tungaloy розробила інноваційні вставки з V-подібним дном та тангенціальні вставки, які запобігають радіальному зміщенню пластин [15].

3. Керамічні пластини

Керамічні пластини, такі як ті, що виготовлені з нітриду кремнію, мають високу твердість та термостійкість. Проте вони менш поширені для обробки алюмінію через їх крихкість і ризик сколювання при обробці м'яких металів [12].

4. Покриття різальних пластин

Для покращення експлуатаційних характеристик пластин застосовуються різні покриття. Наприклад, покриття AlCrN забезпечує високу зносостійкість та термостійкість, що дозволяє працювати на високих швидкостях різання [16]. Інші покриття, такі як TiN, TiAlN та DLC, також використовуються для зменшення тертя та запобігання налипанню матеріалу на інструмент [16] [17].

Вибір матеріалу для різальних пластин при обробці алюмінієвих сплавів залежить від конкретних умов обробки, вимог до якості поверхні та продуктивності. Твердосплавні пластини є універсальним вибором для більшості застосувань, тоді як PCD-пластини підходять для високошвидкісної обробки з високими вимогами до якості поверхні. Застосування відповідних покриттів дозволяє покращити характеристики інструменту та продовжити його термін служби [12] [16].

1.4.2 Особливості геометрії пластин для оброблювання алюмінієвих сплавів

Геометрія різальних пластин відіграє ключову роль в ефективності обробки алюмінієвих сплавів. Через низьку твердість і високу пластичність алюмінію, а також його схильність до налипання на різальну кромку, використання стандартних геометрій часто призводить до погіршення якості поверхні та зростання зносу інструменту [18] [13].

Для уникнення цих проблем пластини повинні мати великий позитивний передній кут — від $+12^\circ$ до $+25^\circ$. Такий кут зменшує силу різання, сприяє поліпшеному утворенню та виведенню стружки, а також мінімізує налипання матеріалу на різальну кромку [18] [19]. Кут задньої поверхні зазвичай становить 7° , що зменшує тертя між пластинами і деталлю та покращує якість обробки [13] [20].

Радіус вершини пластини також має значення. Для алюмінієвих сплавів рекомендується використовувати пластини з малим радіусом вершини — 0,2–0,4 мм. Це забезпечує високу точність обробки, проте надто малий радіус може призвести до ламання різальної кромки [20] [21].

Щодо форми пластини, найчастіше використовуються ромбічні (типу DCGT, VCGT) та круглі (типу RCGT) геометрії. Ромбічні пластини забезпечують точну обробку, тоді як круглі є більш жорсткими і підходять для чорнового фрезерування [21] [22].

Важливо також обирати пластини зі спеціальними стружколамами. Геометрія типу AL (Aluminum) забезпечує ефективне формування короткої стружки та її евакуацію, що особливо актуально при обробці м'яких кольорових сплавів. Полірована передня поверхня пластин сприяє зниженню налипання матеріалу [10] [23].

Загалом, правильна геометрія різальної пластини дає змогу підвищити продуктивність, стабільність процесу обробки, зменшити знос інструмента та забезпечити високу якість обробленої поверхні [18].

У ході підготовки до фрезерної обробки алюмінієвого сплаву було розглянуто дві змінні різальної пластини виробництва компанії Sandvik Coromant — однієї з провідних світових компаній у сфері виготовлення різального інструменту для металообробки. Обидві пластини належать до системи CoroMill 490 і мають однаковий типорозмір — 490R-08T308, однак істотно відрізняються за матеріалом, покриттям і призначенням.

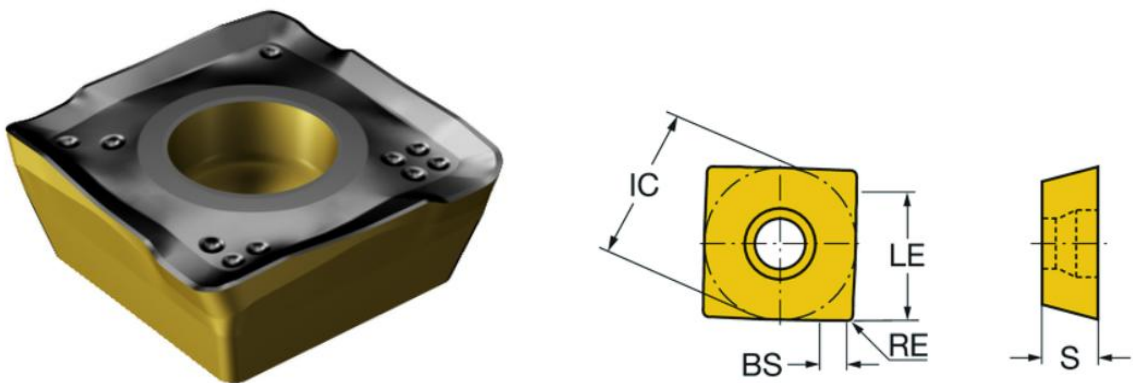


Рисунок 1.10 - пластина 490R-08T308M-KL 3330 (Sandvik Coromant) [24]

Перша пластина — 490R-08T308M-KL 3330 — виготовлена з твердого сплаву з CVD-покриттям, яке складається з шарів TiCN, Al₂O₃ і TiN. Це покриття забезпечує високу зносостійкість під час обробки абразивних матеріалів, таких як чавун. Пластина має чіпоріз типу KL, призначений для стабільної роботи в середніх режимах різання. Основне призначення цієї пластини — чорнова та напівчистова обробка сірого і ковкого чавуну. Однак при обробці алюмінію така пластина є малоефективною, оскільки тверде покриття спричиняє налипання оброблюваного матеріалу на різальну кромку, що погіршує якість поверхні та знижує термін служби інструменту [24].

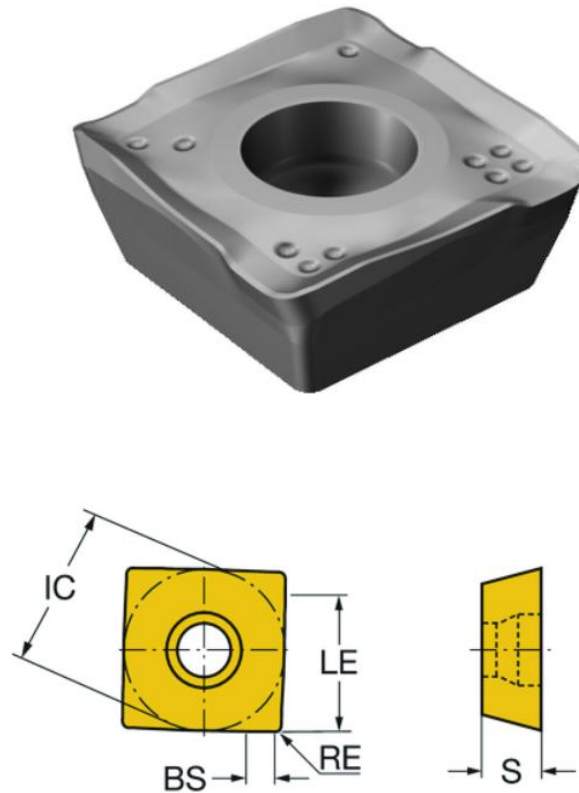


Рисунок 1.11 - пластина 490R-08T308E-ML H13A (Sandvik Coromant) [25]

Інша пластина — 490R-08T308E-ML H13A — спеціально призначена для обробки кольорових металів, зокрема алюмінію. Вона виготовлена з некованого твердого сплаву без будь-якого покриття, що значно знижує ризик налипання стружки на різальну поверхню. Завдяки гострій та полірованій геометрії стружколому L, ця пластина забезпечує легке різання, мінімальні сили опору та високу якість обробленої поверхні. Вона ідеально підходить для чистової та напівчистової обробки алюмінієвих сплавів, забезпечуючи стабільну роботу навіть при високих швидкостях подачі та обертання [25].

З урахуванням вищенаведених характеристик, для виконання обробки алюмінієвого сплаву в даному проєкті було обґрунтовано прийнято рішення використовувати саме пластину 490R-08T308E-ML H13A. Її властивості забезпечують ефективну, надійну та якісну обробку з мінімальним зношуванням інструменту і високим класом чистоти обробленої поверхні.

1.5 Геометричні параметри фрез для обробки кольорових металів

Геометрія різальної частини фрези є одним із ключових факторів, що впливають на ефективність та якість обробки алюмінієвих сплавів. Оскільки алюміній має високу пластичність і схильність до налипання, вибір геометричних параметрів фрези є критично важливим. Для забезпечення стабільного процесу фрезерування, досягнення високої чистоти обробленої поверхні та зниження зношування інструменту застосовуються спеціальні рішення в області геометрії. Через специфічні властивості алюмінію — низьку температуру плавлення (~ 660 °C), високу пластичність, адгезію до інструменту — необхідно особливо ретельно обирати кути різання, форму канавок, кількість зубців, радіус вершини тощо.

Геометрія фрези повинна забезпечувати:

- мінімальне налипання стружки;
- зменшення сил різання;
- стабільність роботи на високих обертах;
- якісну обробку поверхні без задирок;
- збільшений термін служби інструменту.

Передній кут для фрез, призначених для обробки алюмінію, як правило, становить від $+12^\circ$ до $+25^\circ$. Позитивне значення сприяє зменшенню сили різання та поліпшенню процесу врізання в матеріал. При збільшенні кута знижується ризик наростання стружки та перегріву кромки. У високошвидкісних умовах (HSM) бажано використовувати значення γ ближче до верхньої межі цього діапазону [20].

Задній кут для фрез по алюмінію зазвичай обирається в межах 10° – 14° . Він забезпечує зазор між тильною поверхнею і заготовкою, попереджуючи тертя та підвищення температури. Величина кута повинна бути достатньою, щоб уникнути повторного контакту з оброблюваною поверхнею, особливо при мікрорухах або вібраціях [20].

Для обробки алюмінію доцільно використовувати фрези з великим кутом спіралі — 35° – 45° , що забезпечує ефективне стружковидалення. Виробники, зокрема Guhring, рекомендують застосування високополірованих канавок з великим підйомом, щоб зменшити залипання стружки. Особливо актуально це при обробці глибоких кишень і отворів, де є ризик накопичення відходів різання [20].

Для фрезування алюмінієвих сплавів рекомендується використовувати фрези з радіусом вершини 0,2–1,2 мм, залежно від типу обробки. Для чорнової обробки — радіус більший (0,8–1,2 мм), що підвищує міцність різальної кромки та дозволяє використовувати більші подачі. Для чистової обробки — менший (0,2–0,4 мм), що забезпечує високу якість поверхні та точність геометрії. Наявність великого радіуса знижує вібрації та запобігає ламанню стружки [20].

При обробці алюмінію рекомендується використовувати фрези з 2–3 зубцями, що забезпечує більший об'єм стружкових каналів та знижує ймовірність їх забивання. У випадку HSM це також дозволяє підвищити стабільність фрези на великих обертах за рахунок зменшення маси різальної частини. Фрези з більшою кількістю зубців частіше застосовуються для сталі або при жорсткому кріпленні заготовки [20].

Широка фаска (0,1–0,4 мм) допомагає рівномірно розподіляти навантаження та зменшує знос різальної кромки. Однак при цьому збільшується сила різання, тому у чистовій обробці доцільно використовувати мінімальну фаску (0,05–0,1 мм). Якщо пріоритет — висока якість поверхні, тоді найкращим варіантом буде відточена кромка (E-land geometry) або Wiper-геометрія, яка дозволяє підвищити подачу без погіршення шорсткості [20].

Діаметр фрези повинен узгоджуватись з розміром оброблюваних елементів та жорсткістю системи. Наприклад, для кишень шириною 20 мм доцільно використовувати фрезу $\varnothing 16$ мм або менше. Допоміжні кути (в плані ϕ) та мікрофаски впливають на формування стружки та довговічність кромки. Wiper-вставки зі спеціальним заокругленням дозволяють досягти $R_a < 0,8$ мкм навіть при подачах $> 0,2$ мм/зуб [20].

Таблиця 1.2 – Рекомендовані геометричні параметри кінцевих фрез для обробки алюмінієвих сплавів [20]

Параметр	Рекомендоване значення
Передній кут γ	$+15^\circ \dots +25^\circ$
Задній кут α	$10^\circ \dots 14^\circ$
Кут нахилу спіралі λ	$35^\circ \dots 45^\circ$
Радіус при вершині r_ϵ	0,2...1,2 мм
Кількість зубців Z	2–3
Ширина фаски	0,05...0,4 мм

Ці параметри формуються з урахуванням експлуатаційних умов, типу верстата, режимів обробки, жорсткості заготовки та вимог до точності. Їх грамотне поєднання дозволяє підвищити ефективність фрезерування алюмінію, особливо в авіаційній промисловості, де точність і надійність обробки мають критичне значення.

Широка фаска підвищує міцність, але збільшує силу різання. Для фрезерування алюмінію краще використовувати гостро заточену кромку без фаски, або Wiper-кромку [26] — спеціально заокруглену кромку для зменшення шорсткості при більшій подачі. Для мінімізації налипання обов'язковим є дзеркальне полірування канавок. Це зменшує контакт стружки з поверхнею інструменту та полегшує її виведення. Для алюмінію часто застосовуються [26]:

- без покриття — щоб не знижувати гостроту кромки;
- TiB_2 , DLC — покриття з низьким коефіцієнтом тертя, що зменшують налипання та перегрів.

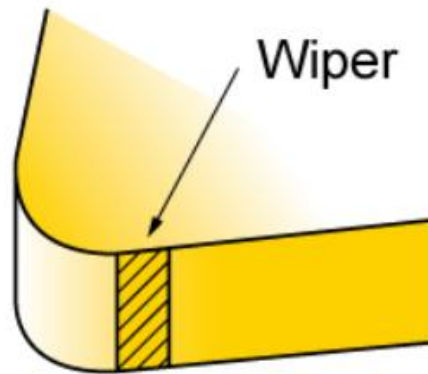


Рисунок 1.12 - Wiper-кромок (Mitsubishi Materials) [26]

Ретельний підбір геометричних параметрів дозволяє адаптувати фрезу до особливостей алюмінієвих сплавів. Власна конструкція фрези, яка буде спроектована в межах цього дипломного проекту, повинна враховувати:

- позитивний передній і задній кут;
- обмежену кількість зубців;
- поліровані канавки;
- радіус вершини для чистової обробки;
- можливість роботи при MQL або повітряному охолодженні;

Параметри, викладені в цьому підпункті, будуть враховані під час проектування власної конструкції кінцевої фрези для обробки алюмінієвих сплавів у наступних розділах [32].

1.6 Порівняння фрез за каталогами провідних виробників

Для визначення найбільш раціональних параметрів конструкції кінцевої фрези, призначеної для обробки алюмінію, було проаналізовано продукцію провідних виробників інструменту: Sandvik Coromant, Guhring та ZCC-CT. Усі порівнювані моделі є серійними виробами, призначеними саме для обробки кольорових металів і мають кінцеву форму конструкції.

У таблиці нижче наведено технічні характеристики фрез, які були відібрані для порівняння [20]:

Таблиця 1.3 – Порівняння технічних характеристик кінцевих фрез для обробки алюмінієвих сплавів [20]

Виробник	Серія фрези	Конструкція	Кількість зубців	Покриття / обробка	Кут спіралі	Матеріал / вставки	Охолодження
Sandvik Coromant	CoroMill Plura ALU	цільна	2–3	без покриття, дзеркальна канавка	40–45°	твердий сплав	без MOTC або MQL
Sandvik Coromant	CoroMill 316 ALU	збірна (модульна)	2–3	DLC або TiB ₂	до 45°	PCD / WC з поліруванням	повітря / MQL
Guhring	RF 100 A	цільна	2–3	без покриття або DLC	45°	ультра твердий сплав	без MOTC або повітря
Guhring	RF 100 Speed	цільна	3–4	дзеркальне полірування	40–43°	мікрозернистий твердий сплав	MQL
ZCC-CT	AL-2E / AL-3E / AL-4E	цільна	2–4	без покриття або ALCR	35–40°	мікрозернистий сплав	без MOTC

Аналіз порівнюваних фрез показав, що найкращі результати при обробці алюмінієвих сплавів демонструють інструменти з позитивною геометрією (великий передній кут), полірованими канавками, мінімальною кількістю зубців та відсутністю покриття, що сприяє зниженню адгезії. Усі моделі розраховані на високі швидкості різання (до 3000–4700 м/хв), що підтверджує їхню ефективність у високошвидкісному фрезеруванні (HSM).

Особливо цікавою є серія CoroMill 316 [27], яка поєднує переваги модульної збірної конструкції з високою точністю та зручністю заміни різальної частини. Це дозволяє економити ресурс і швидко адаптувати інструмент під різні операції [27]. Водночас цільні фрези, як-от RF 100 A [30] чи AL-2E [28], мають кращу динамічну жорсткість і підходять для тонкостінних деталей або при роботі в умовах вібрацій [20].

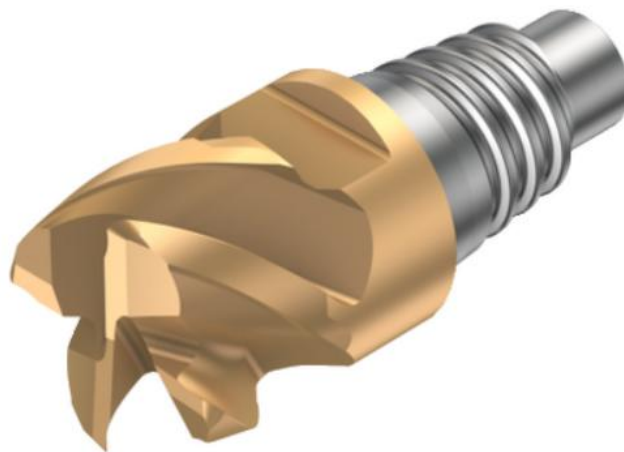


Рисунок 1.13 - CoroMill 316 (Sandvik Coroman) [27]



Рисунок 1.14 - Фреза AL-2E (Solid – Splug) [28]

Аналіз конструкцій за каталогами провідних виробників сформував технічну основу для обґрунтованого вибору параметрів та концепції майбутньої конструкції інструменту, для розробки власної моделі збірної кінцевої фрези, що буде поєднувати кращі властивості порівнюваних інструментів: легкий корпус,

модульну змінну головку, поліровані канавки, адаптацію до HSM та сумісність з системами MQL [20].

Крім того, серед досліджених фрез відзначено низку геометричних рішень, які безпосередньо впливають на ефективність обробки алюмінію. Наприклад, серія RF 100 Speed [29] має асиметричні канавки та змінний кут нахилу спіралі по довжині різальної частини, що значно зменшує вібрації й забезпечує рівномірне навантаження на кромки. Такий підхід особливо актуальний при роботі з тонкостінними деталями авіаційного призначення [20], [28].



Рисунок 1.15 - RF 100 Speed (Guhring) [29]

У порівнянні цільних і збірних фрез важливо відзначити, що перші забезпечують вищу точність. Водночас збірні фрези (зокрема CoroMill 316 [2]) дають змогу зменшити витрати на обслуговування, замінювати різальні головки та гнучко адаптувати інструмент під тип операції. Саме це робить модульні збірні системи доцільними для серійного виробництва, де важлива швидкість налаштування та універсальність.

Наприклад, за даними виробника, фреза RF 100 A [30] при $\varnothing 10$ мм рекомендується до використання з такими параметрами: швидкість різання 1500–2500 м/хв, подача на зуб 0,05–0,12 мм/зуб, глибина різання до 1,5 мм при напівчистовій обробці. Це демонструє можливість роботи на високих обертах без охолоджувача або з подачею MQL, що є стандартом у сучасному обробленні алюмінію [20], [30].

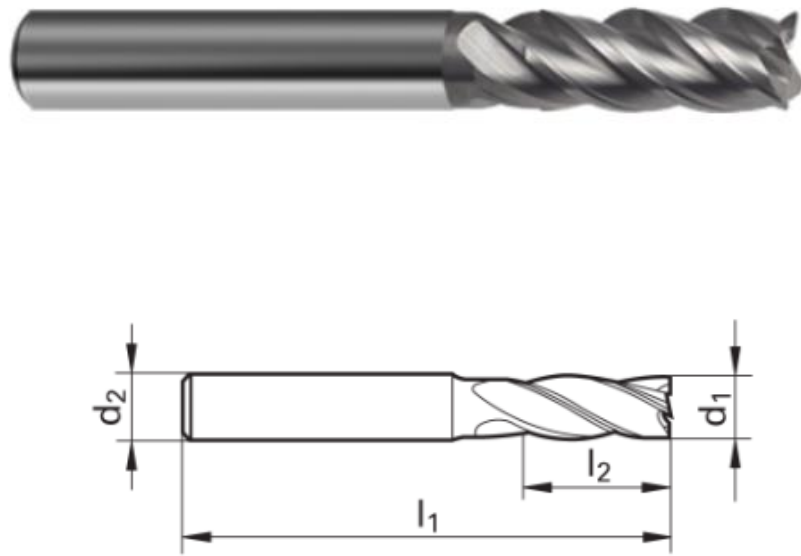


Рисунок 1.16 - фреза RF 100 A (Guhring) [30]

Проведений каталоговий аналіз фрез дозволив встановити найефективніші конструктивні та геометричні параметри, які забезпечують високу продуктивність, надійність та якість обробки алюмінієвих сплавів саме кінцевими інструментами., що буде поєднувати кращі властивості порівнюваних інструментів: легкий корпус, модульну змінну головку, поліровані канавки, адаптацію до HSM та сумісність з системами MQL [20].

Висновки за розділом

У цьому розділі проведено аналіз використовуваних алюмінієвих сплавів, умов їх фрезерування, а також конструкцій, геометрії та інженерних рішень, які застосовуються у сучасних кінцевих фрезах. Встановлено, що алюміній як матеріал потребує особливого підходу до обробки, зокрема врахування його пластичності, теплопровідності та схильності до налипання. Це зумовлює необхідність застосування фрез зі спеціальною геометрією — великим переднім кутом, малою кількістю зубців, полірованими канавками та інколи без покриття.

Проаналізовано відмінності між цільними та збірними конструкціями кінцевих фрез. Цільні фрези характеризуються високою жорсткістю та точністю, але менш гнучкі в експлуатації. Збірні — дозволяють швидку заміну різальної частини та адаптацію до умов обробки. Особливу увагу приділено модульним системам, зокрема Duo-Lock, які поєднують високу точність і сервісну зручність.

Проаналізовано геометричні параметри фрез для алюмінію, зокрема значення переднього та заднього кутів, кута нахилу спіралі, кількості зубців, ширини фаски та радіуса вершини. Узагальнення отримано на основі рекомендацій каталогів Sandvik, Guhring, ZCC-CT та науково-технічної літератури.

Результати патентного пошуку підтвердили актуальність застосування збірних кінцевих фрез у вигляді модульних рішень із високою точністю з'єднання та легкістю обслуговування. Система Duo-Lock (US9643262B2 [7] та US9643264B2 [8]) визначена як прототип для подальшого проектування.

У фінальній частині розділу проведено порівняння комерційних фрез, рекомендованих для обробки алюмінію. Виділено найбільш ефективні інженерні рішення, які доцільно враховувати при створенні власної конструкції: легкий корпус, модульна головка, адаптація до HSM, стружковідвідні канавки та сумісність з MQL.

Накопичені в розділі дані створюють міцне підґрунтя для подальшого етапу роботи — безпосереднього проектування зірної кінцевої фрези, яка буде оптимізована під умови високошвидкісної обробки алюмінієвих деталей.

2 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

2.1 Обґрунтування вибору типу фрези

У цьому розділі розглянуто вибір типу інструменту для фрезерування алюмінієвих сплавів у режимах високошвидкісної обробки (HSM), відповідно до вимог технічного завдання: $R_a \leq 0,32$ мкм, обробка на вертикальному багатоцільовому верстаті з ЧПК (HAAS VP-5). Конструкція має забезпечувати точність, стабільність при великих обертах, економічність і простоту заміни різальних елементів. Об'єктом обробки є кишені, уступи, та внутрішні площини — саме ті поверхні, для яких найдоцільніше застосовувати кінцеву фрезу.

Згідно з сучасними тенденціями обробки алюмінію, найбільш ефективним інструментом для таких умов є збірна кінцева фреза з механічним кріпленням змінних різальних елементів. Це дозволяє багаторазово використовувати корпус фрези, змінюючи лише зношені головки або пластини. До переваг такого підходу належать зменшення вартості експлуатації, спрощення обслуговування, а також можливість швидкої адаптації інструмента до різних операцій або матеріалів.

Під час патентного аналізу знайдено конструкції, що безпосередньо відносяться до теми: US9643262B2 [7] і US9643264B2 [8] (Duo-Lock), які описують кінцеву фрезу зі змінною різальною головкою. Вона дозволяє працювати на швидкостях до 30 000 об/хв, забезпечує стабільність, модульність і зменшення простоїв виробництва. Це підтверджує доцільність вибору саме такої конфігурації.

Досвід провідних виробників підтверджує ефективність застосування саме збірних кінцевих фрез для обробки алюмінію. Зокрема, серія CoroMill 316 (Sandvik) [2] є класичним прикладом модульної кінцевої фрези зі змінною різальною головкою, яка фіксується до корпусу за допомогою високоточних різьбових. Інші приклади, що реалізують подібні принципи, зустрічаються в каталозі WIDIA, Haimer та Kennametal, однак не всі з них є саме кінцевими

інструментами. Тому CoroMill 316 [2] є найбільш придатною конструкцією, яку можна вважати орієнтиром при створенні власної моделі.

З урахуванням умов експлуатації, технологічного призначення, конструктивних можливостей та доступних аналогів, вибір конструкції збірної кінцевої фрези для обробки алюмінію є технічно обґрунтованим і рішенням. Такий інструмент забезпечить задану шорсткість, високу точність, економічність та відповідатиме сучасним стандартам авіаційного та машинобудівного виробництва.

2.2 Вибір матеріалів для різальних елементів та корпусу

Правильний вибір матеріалів для корпусу та різальних елементів конструкції кінцевої збірної фрези має критичне значення для забезпечення стабільної роботи інструмента, його стійкості до зносу, точності та відповідності вимогам високошвидкісної обробки алюмінієвих сплавів. В умовах, коли інструмент функціонує при великих швидкостях обертання (до 20 000 об/хв і більше), обробляючи алюміній марки 7075 з заданою шорсткістю $Ra \leq 0,32$ мкм, вибір матеріалів повинен враховувати не лише механічну міцність, але й масу, термічну стабільність, а також технологічність виготовлення.

Вибір матеріалу для корпусу фрези

Корпус є базовим елементом інструмента, до якого кріпиться змінна різальна частина. Він повинен витримувати механічне навантаження при передачі крутного моменту, забезпечувати точну фіксацію головки та стабільну роботу при високошвидкісних режимах. Основними критеріями вибору є: маса, жорсткість, технологічність обробки, зносостійкість посадочних елементів.

Для виготовлення корпусу та головки кінцевої фрези було обрано конструкційну леговану сталь 40X. Цей матеріал має оптимальне поєднання міцності, зносостійкості та технологічності при обробці. Завдяки вмісту хрому, сталь демонструє хорошу загартовуваність, що дозволяє забезпечити необхідну твердість та надійність у процесі експлуатації. Такий вибір є доцільним для

деталей, які зазнають значних механічних навантажень та повинні зберігати точність форми у жорстких умовах різання.

Як різальний елемент застосовано змінну твердосплавну пластину Sandvik типу 490R-08T308E-ML з маркуванням H13A. Ця марка твердого сплаву характеризується високою твердістю, відмінною термостійкістю та стійкістю до абразивного зносу, що особливо важливо при обробці сталей. Завдяки геометрії пластини забезпечується ефективне стружковидалення, стабільність у процесі фрезерування та зменшення навантаження на інструмент [31].

Кріплення різальних елементів здійснюється за допомогою гвинта Sandvik 5513 020-33, який спеціально призначений для надійної фіксації пластин у тримачі. Такий гвинт забезпечує необхідне притискне зусилля, а також є стійким до вібрацій та високих температур, що виникають під час обробки.

Для герметизації окремих вузлів використовується ущільнювальне кільце типу O-Ring за стандартом ISO 3601-1, розміру 015A 14×1.78 мм, виготовлене з нітрилового каучуку (NBR). Цей матеріал має високу стійкість до мастил, охолоджувальних рідин та інших робочих середовищ, що дозволяє зберігати герметичність та довговічність вузла.

Вибір матеріалів і комплектуючих елементів забезпечує надійність, довговічність та ефективність роботи кінцевої фрези при різноманітних умовах експлуатації.

У рамках вибору матеріалів для конструкції збірної кінцевої фрези обґрунтовано доцільність застосування сталі 40X як локального матеріалу для армування посадкових зон корпусу. Цей матеріал забезпечує необхідний запас міцності, стійкість до зносу й термічну стабільність у зонах кріплення, що критично важливо при експлуатації фрези в умовах високих обертів та повторного монтажу різальних головок.

2.3 Конструкція збірної кінцевої фрези

Проектована фреза належить до групи збірних кінцевих фрез зі змінною різальною головкою та з механічним кріпленням пластин. Така конструкція поєднує точність та жорсткість, характерну для цільних інструментів, із зручністю обслуговування та гнучкістю застосування модульного інструменту. Особливу увагу приділено придатності інструмента до високошвидкісної обробки алюмінієвих сплавів, зокрема EN AW-7075, з вимогами до шорсткості $Ra \leq 0,32$ мкм.

Фреза складається з наступних основних елементів:

- корпус і головка сталі 40X;
- гвинтового вузла кріплення, що забезпечує точне позиціонування та можливість багаторазової заміни головки;
- внутрішніх каналів для подачі повітря або масляного туману;
- маркувальних елементів для контролю сумісності різальних елементів.

Корпус фрези має форму циліндричного тіла з хвостовиком типу Weldon, сумісним із ЧПК-верстатом. Посадка під головку виконана з допуском H6/h5 для забезпечення співвісності. У тілі корпусу передбачені два отвори під установочні різьбовий отвір для фіксуєчого гвинта (M5 або M6). Для зниження маси та забезпечення балансу в зоні посадки виконані компенсаційні вибірки.

Змінна головка містить два зуба зі змінними пластинами та геометрією;

- передній кут $\gamma = +20^\circ$;
- задній кут $\alpha = 12^\circ$;
- кут спіралі $\lambda = 40^\circ$;
- радіус вершини $r_\epsilon = 0,4$ мм;
- ширина фаски 0,15 мм;
- канавки — дзеркально поліровані, S-подібного профілю.

Головка фіксується в корпусі за допомогою системи типу «Duo-Lock»: циліндричне центрування, центральний гвинт.

Конструкція фрези збалансована до рівня G2.5 при 25 000 об/хв. Центрування головки виконується через посадочні пояски, які шліфуються на координатно-шліфувальному обладнанні. Загальна довжина інструменту становить 80 мм, довжина робочої частини — 15–20 мм залежно від головки. Зовнішній діаметр — Ø10 мм або Ø12 мм.

Важливо, що така конструкція дозволяє швидко змінювати різальну головку без зняття корпусу з верстата, що скорочує час переналагодження. Крім того, її можна адаптувати під різні типорозміри та конфігурації заготовок шляхом підбору іншої геометрії головки при незмінному корпусі.

Запропонована конструкція відповідає вимогам до точності, жорсткості, ремонтпридатності й продуктивності, які ставляться до кінцевих фрез у сучасному авіаційному та загальномашинобудівному виробництві при обробці алюмінієвих деталей.

Для визначення режимів різання під час фрезерування алюмінієвих сплавів збірною кінцевою фрезою застосовано розрахункову методику згідно з нормативними джерелами та каталогами провідних виробників (Sandvik, Guhring, ZCC-CT), адаптовану під умови високошвидкісної обробки (HSM).

Вихідні дані:

- Діаметр фрези (D) — 20 мм;
- Кількість зубців (z) — 2;
- Матеріал різальної частини — мікрозернистий твердий сплав WC-Co;
- Оброблюваний матеріал — алюмінієвий сплав 7075 (EN AW-7075);
- Тип обробки — напівчистова ($R_a \approx 0,32$);
- Тип верстата — вертикальний ЧПК-центр із швидкістю обертання до 20000 об/хв.

Розрахунок:

- Рекомендована швидкість різання для алюмінію при фрезеруванні WC-Co:
 $V_c = 800$ м/хв (WC-Co, як твердий сплав, дозволяє працювати на дуже високих швидкостях, особливо з кольоровими металами (алюміній, мідь).
 Типі фрезерування: при високошвидкісному фрезеруванні (HSM — High

Speed Machining) для алюмінію швидкість може досягати навіть 1000–3000 м/хв, але 800 м/хв — це безпечна середня величина для більшості стандартних умов (Sandvik Coromant));

- Подача на зуб для напівчистої обробки: $fz = 0,08$ мм/зуб;
- Глибина різання (a_p): 1,5 мм;
- Ширина різання (a_e): 5 мм.

Частота обертання (n) розраховується за формулою:

$$n = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot D}$$

$$n = \frac{1000 \cdot 800}{3,14 \cdot 20} \sim 12\,732 \text{ об/хв}$$

Оскільки верстат має обмеження по шпинделю, фактичне значення буде прийняте: $n = 20\,000$ об/хв

Подача на оберт (S):

$$S = fz \cdot z$$

$$S = 0,08 \cdot 2 = 0,16 \text{ мм/об}$$

Подовжня подача (V_f):

$$V_f = S \cdot n$$

$$V_f = 0,16 \cdot 12\,732 = 2037 \text{ мм/хв}$$

Застосування таких режимів забезпечує якісне формування поверхні без налипання стружки, збереження різальної кромки та ефективне використання ресурсу інструменту. Розраховані параметри повністю відповідають умовам високошвидкісної обробки алюмінієвих сплавів та можуть бути рекомендовані як базові при впровадженні конструкції в технологічний процес.

Для наочності нижче подано креслення деталями конструкції збірної кінцевої фрези:

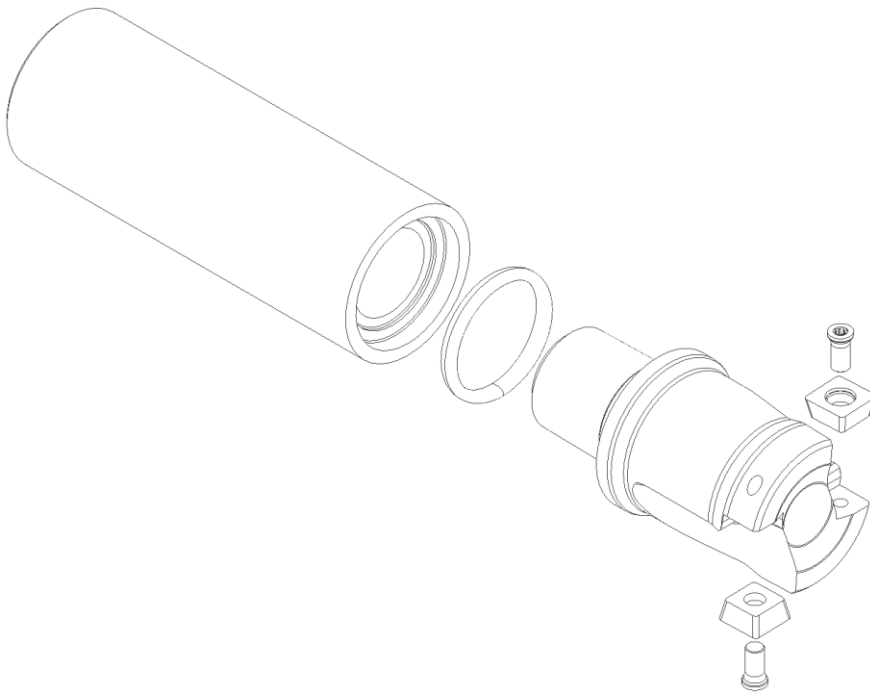


Рисунок 2.1 - Конструкції збірної кінцевої фрези

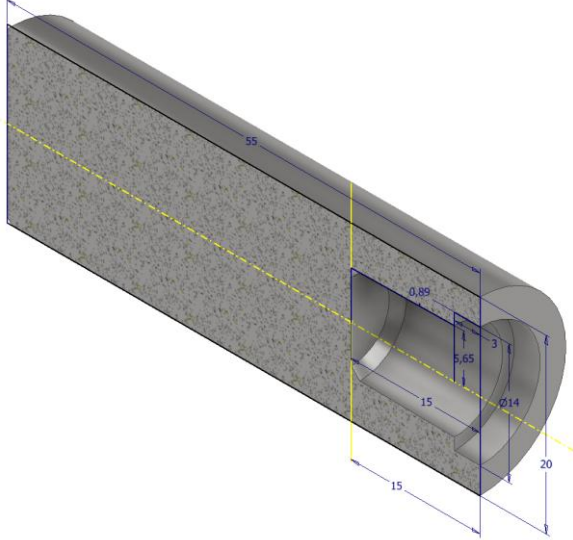
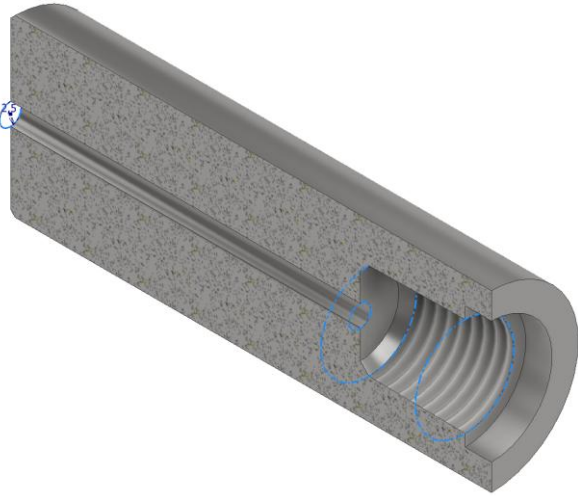
Корпус фрези кінцевої і головка фрези кінцевої - 40X, пластина Sandvik490R-08T308E-ML H13A, гвинт Sandvik 5513 020-33, кільце ущільнювальне O-Ring ISO 3601-1 015A 14×1.78 N.

Креслення можна використовувати як приклад до розробки технологічної документації та для складання технічної специфікації вимогам до точності, жорсткості, ремонтпридатності й продуктивності, які ставляться до кінцевих фрез у сучасному авіаційному та загальномашинобудівному виробництві при обробці алюмінієвих деталей.

2.4 Побудова моделі інструмента в CAD-середовищі

Виконаємо 3D-модель фрези кінцевої за прийнятими конструктивними рішеннями в CAD-системі Autodesk Inventor Professional. Послідовне виконання моделі з зазначенням застосованих операцій представлено у вигляді таблиці. Проектована фреза є зірною та складається з хвостовика (табл. 2.1) та головки (табл. 2.2).

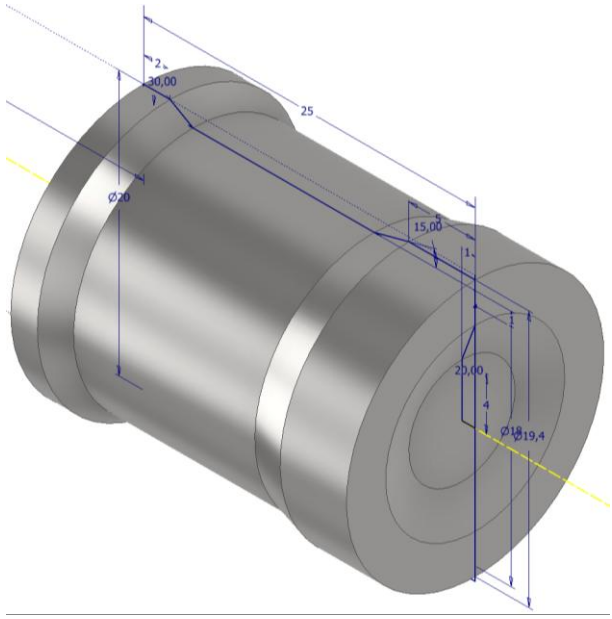
Таблиця 2.1 – Побудова 3D-моделі хвостовика фрези кінцевої

№	Назва використаних операцій	Опис операції	Ескіз
1	Обертання, фаска	Створюємо базову геометрію хвостовика операцією обертання одразу з кінчним отвором під різьбу. Додаємо фаски	
2	Різьба, видавлювання	Додаємо різьбу за ISO та видавлюємо наскрізний отвір	

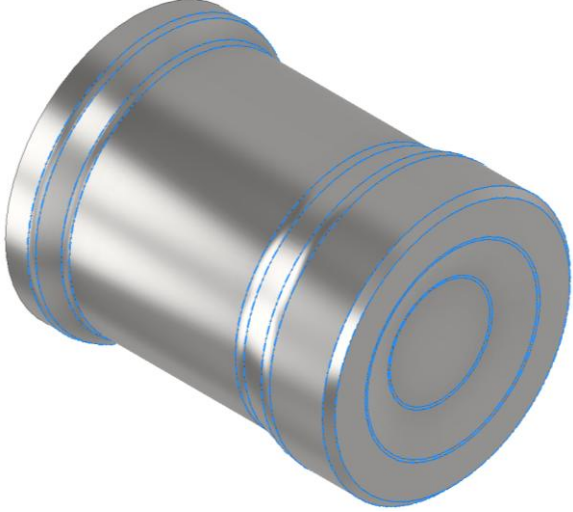
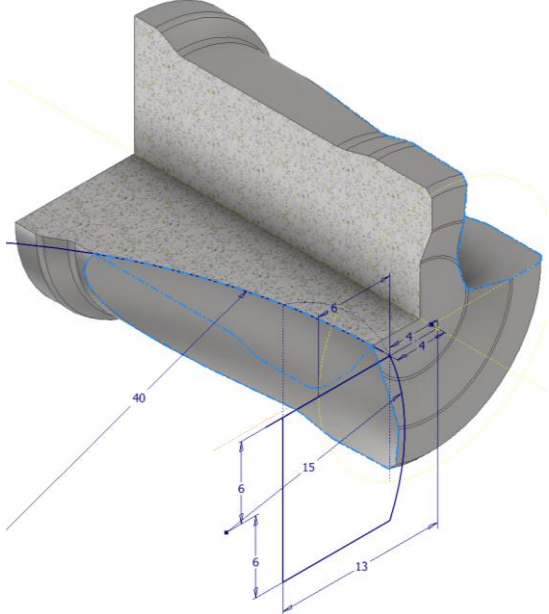
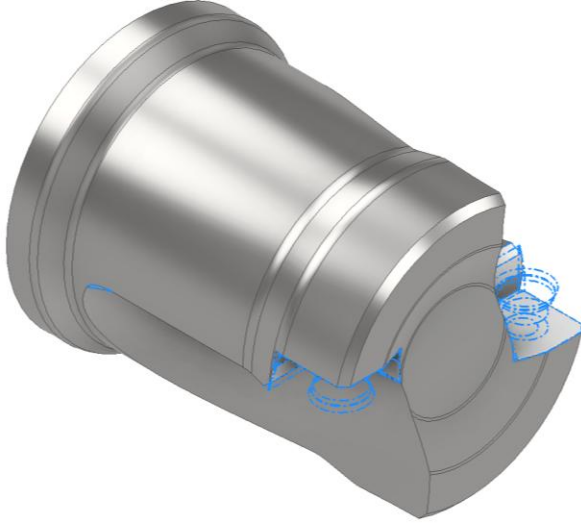
Кінець таблиці 2.1

№	Назва використаних операцій	Опис операції	Ескіз
3	Обертання, заокруглення	Операцією обертання за ескізом виконуємо канавку та додаємо радіуси заокруглення	

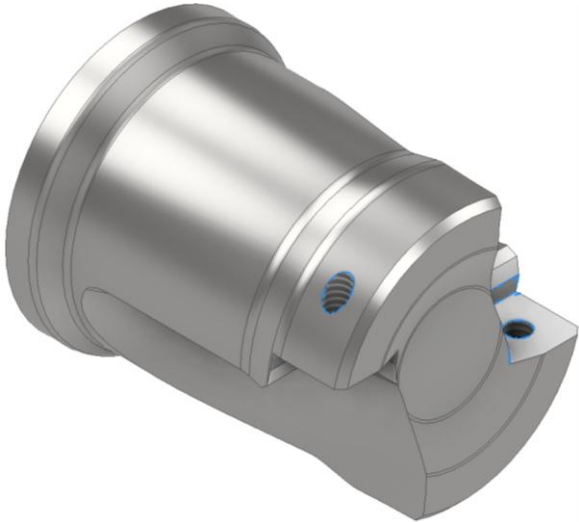
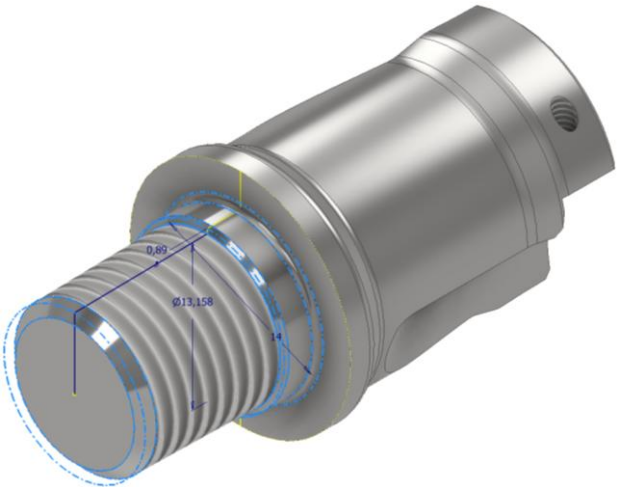
Таблиця 2.2 – Побудова 3D-моделі головки фрези кінцевої

№	Назва використаних операцій	Опис операції	Ескіз
1	Обертання	Створюємо базове тіло обертання	

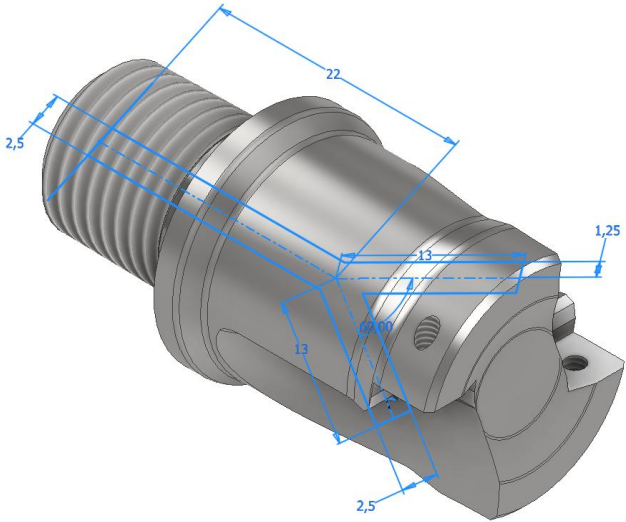
Продовження таблиці 2.2

№	Назва використаних операцій	Опис операції	Ескіз
2	Фаска, заокруглення	Додаємо фаску та радіуси заокруглень	
3	Зсув, круговий масив	Створюємо стружкову канавку зсувом профілю по напрямній, після чого формуємо другу за допомогою кругового масиву	
4	Комбінування (вирізання), видавлювання, круговий масив, фаска, заокруглення	Формуємо пази під пластини операціями вирізання та видавлювання. Додаємо фаску та радіуси заокруглень. Масивом відтворюємо виконані операції симетрично	

Продовження таблиці 2.2

№	Назва використаних операцій	Опис операції	Ескіз
5	Отвір, круговий масив	Виконуємо наскрізні різбові отвори на дні пазу	
6	Видавлювання, обертання, різьба, заокруглення, фаска	Видавлюємо циліндричну частину хвостовика, а після – обертанням формуємо конус. Додаємо різьбу, радіус заокруглення та фаски	

Кінець таблиці 2.2

№	Назва використаних операцій	Опис операції	Ескіз
7	Видавлювання, заокруглення	Симетрично відносно осі видавлюємо отвір складної форми, додаємо радіуси заокруглень що дорівнюють половині діаметра отвору	

Результатом моделювання є виконані 3D-моделі хвостовика та головки фрези. Фреза в зборі з іншими деталями – пластини, гвинти та ущільнювальне кільце – представлена на рис. 2.2. На основі 3D-моделей були виконані робочі кресленики хвостовика та головки, а також складальний кресленик фрези кінцевої в зборі.



Рисунок 2.2 – Зображення змодельованої фрези кінцевої в зборі

Висновки за розділом

В цьому розділі було спроектовано конструкції збірної кінцевої фрези з механічним кріпленням пластин для оброблення алюмінієвого сплаву.

Побудова 3D-моделі хвостовика фрези кінцевої, представлено у (табл. 2.1) і побудова 3D-моделі головки фрези кінцевої (табл. 2.2). В підсумку було виконано складальний кресленик кінцевої фрези та робочі кресленики її деталей.

Отримана конструкція корпусу надалі буде використовуватись для написання технологічного процесу виготовлення, розрахунків режимів різання та виконання керуючої програми.

3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

3.1 Технологічний процес виготовлення корпусу фрези

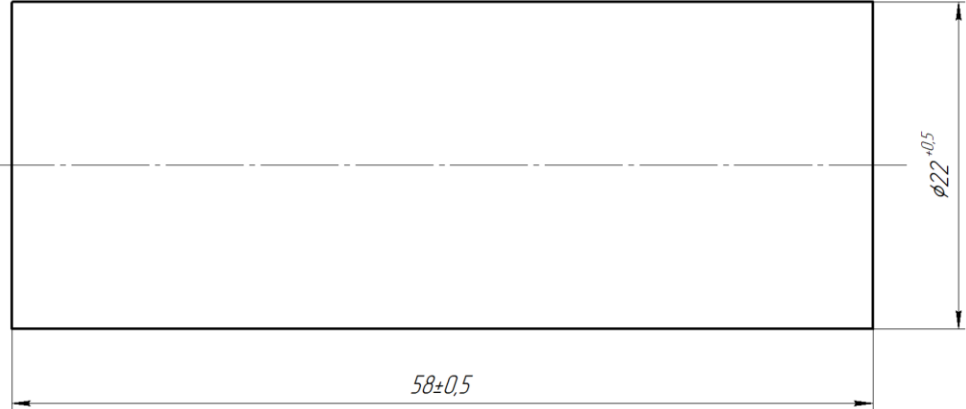
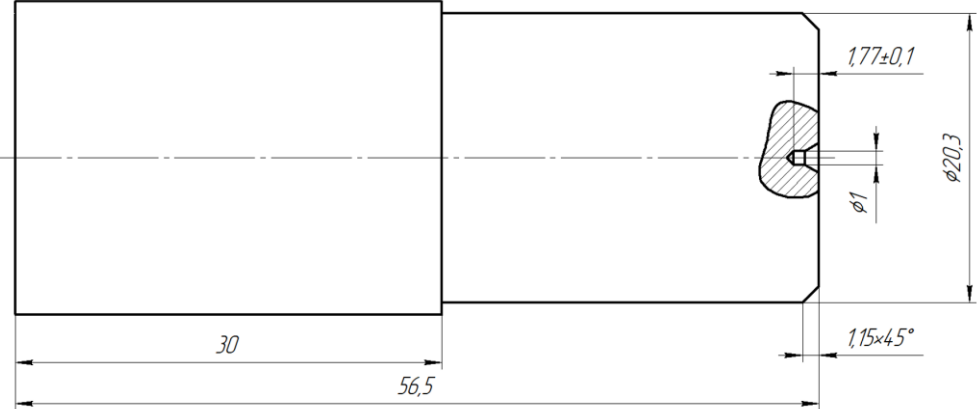
Розробка технологічного процесу виготовлення корпусу фрези передбачає послідовне виконання низки операцій, спрямованих на формування необхідної форми, розмірів та якості поверхонь. На першому етапі здійснюється вибір заготовки, яка повинна відповідати вимогам до матеріалу та розмірів майбутнього виробу. Далі проводиться токарна обробка, що включає чорнове та чистове точіння, з метою надання заготовці необхідної циліндричної форми та підготовки базових поверхонь для подальших операцій.

Після токарної обробки виконується фрезерування, яке дозволяє сформувати площини, пази та інші елементи конструкції корпусу фрези. Для забезпечення високої точності та повторюваності обробки застосовуються верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК), що дозволяє автоматизувати процес та мінімізувати вплив людського фактора.

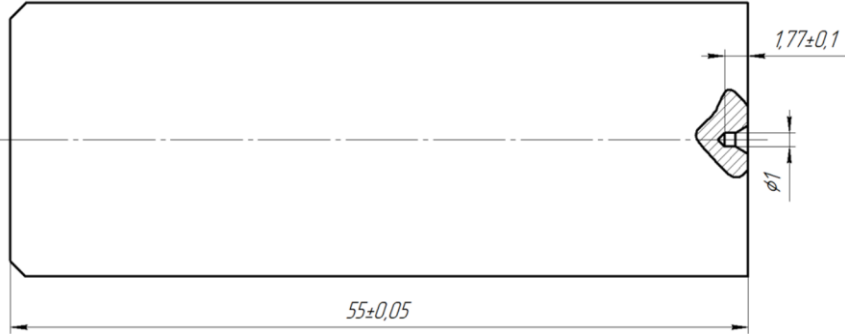
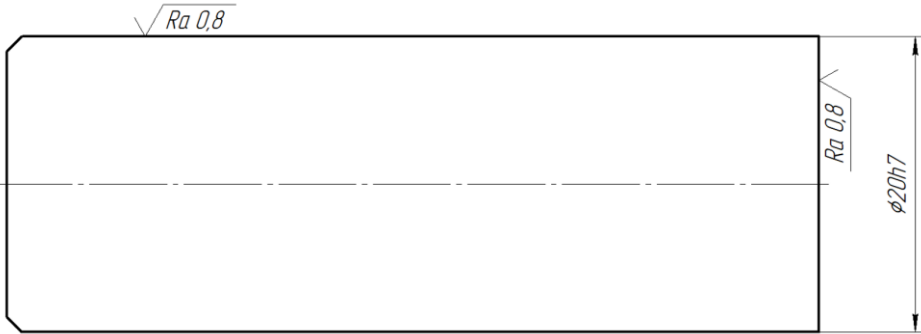
Важливим аспектом при розробці технологічного процесу є розрахунок припусків на обробку, вибір оптимальних режимів різання та підбір відповідного інструменту.

Таким чином, технологічний процес виготовлення корпусу фрези, представлений у табл. 3.1, є комплексом взаємопов'язаних операцій, що вимагають ретельного планування та точного виконання. При його розробці за мету ставилось використання простих, добре освоєних на виробництві операцій, що не потребують спеціального обладнання чи складної перенастройки верстатів. Це дозволяє спростити процес виготовлення та зменшити його вартість. Крім того, перевага надавалась універсальному технологічному оснащенню, яке легко адаптується до схожих типорозмірів деталей.

Таблиця 3.1 – Технологічний процес виготовлення корпусу фрези кінцевої

№	Назва та зміст операції	Ескіз операції	Верстат, інструмент	Прийоми
005	<p align="center"><u>Заготівельна</u> Відрізання заготовки</p>		Відрізний верстат ЕОС-355-2650	Лещата
010	<p align="center"><u>Токарна з ЧПК</u> Установ. А. Підрізання торця, точіння зовнішньої циліндричної поверхні. Центрування</p>		Токарний верстат з ЧПК MAST ML 500x1000 SH8; різці типу 1, 5; центрувальне свердло φ1 мм	Патрон трьохкулачковий

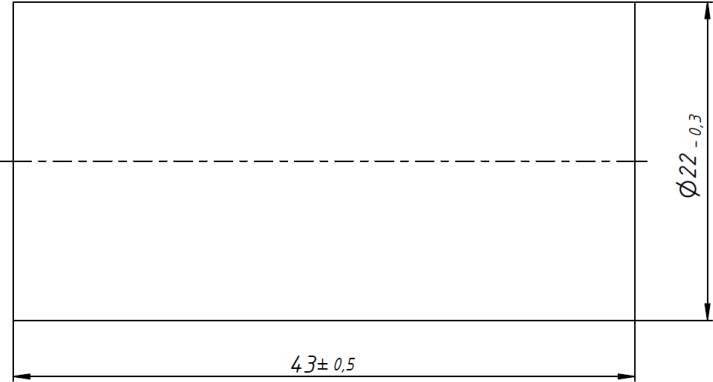
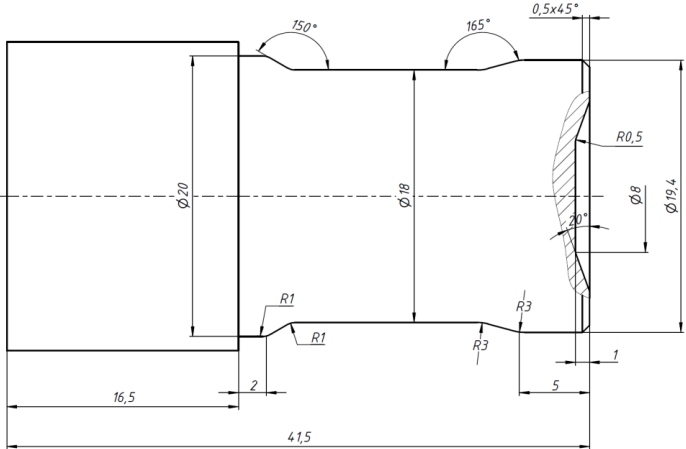
Продовження таблиці 3.1

№	Назва та зміст операції	Ескіз операції	Верстат, інструмент	Пристосування
010	<p>Установ. Б.</p> <p>Підрізання торця, точіння зовнішньої циліндричної поверхні. Центрування</p>		<p>Токарний верстат з ЧПК MAST ML 500x1000 SH8; різці типу 1,5; центрувальне свердло ø1 мм</p>	<p>Патрон трьохкулачковий</p>
015	<p><u>Шліфувальна</u></p> <p>Шліфування циліндру, торця</p>		<p>Круглошліфувальний верстат CG 1500, шліфувальний круг</p>	<p>Центри</p>
020	<p><u>Термічна</u></p> <p>Термообробка (відпуск, гартування)</p>	-	<p>Піч для гартування</p>	<p>Щипці, захисний одяг</p>

Кінець таблиці 3.1

№	Назва та зміст операції	Ескіз операції	Верстат, інструмент	Пристосування
025	<p><u>Багатоцільова</u></p> <p>Свердлити наскрізний отвір $\varnothing 2,5$ мм. Свердлити отвір $\varnothing 16,7$ мм на глибину 2,3 мм, отвір $\varnothing 14$ мм до 3 мм. Нарізання конусної різьби $Rc\ 1/4 - ISO\ 7-1$. Зняти фаску</p>		<p>Вертикально-фрезерний верстат з ЧПК HAAS VF-2; свердла $\varnothing 2,5$ мм, $\varnothing 14$ мм, $\varnothing 16,7$ мм; конічний різьбонарізний інструмент (мітчик $Rc\ 1/4$)</p>	<p>Патрон трьохкулачковий</p>
030	<p><u>Маркувальна</u></p> <p>Маркувати $\varnothing 20$ фреза, логотип виробника, порядковий номер</p>	-	<p>Апарат лазерного гравіювання Polystar Laser PL-100</p>	-
035	<p><u>Контрольна</u></p> <p>Контролювати розміри, биття та циліндричність</p>	-	<p>Набір вимірювальних та контрольних інструментів</p>	-

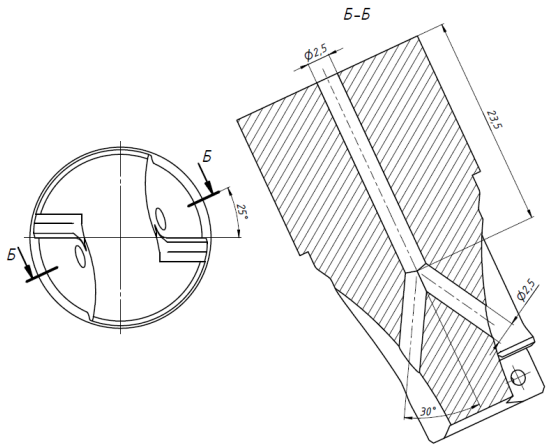
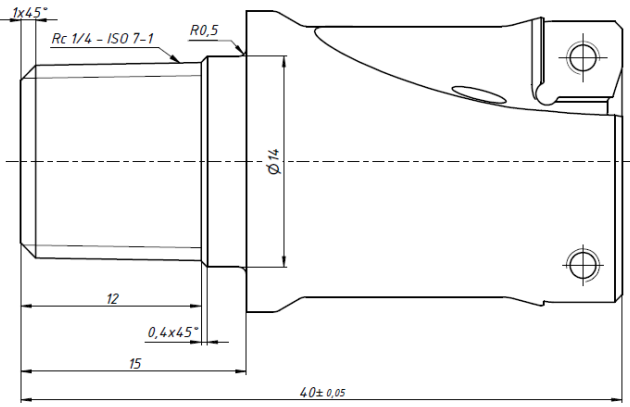
Таблиця 3.2 – Технологічний процес виготовлення головки фрези кінцево

№	Назва та зміст операції	Ескіз операції	Верстат, інструмент	Прийомні пристосування
005	<p style="text-align: center;"><u>Заготівельна</u> Відрізання заготовки</p>		<p style="text-align: center;">Відрізний верстат ЕОС-355-2650</p>	<p style="text-align: center;">Лещата</p>
010	<p style="text-align: center;"><u>Токарна з ЧПК</u> Точіння зовнішнього контуру</p>		<p style="text-align: center;">Токарний верстат з ЧПК MAST ML 500x1000 SH8; різець прохідний упорний, різець прохідний</p>	<p style="text-align: center;">Патрон трьохкулачковий</p>

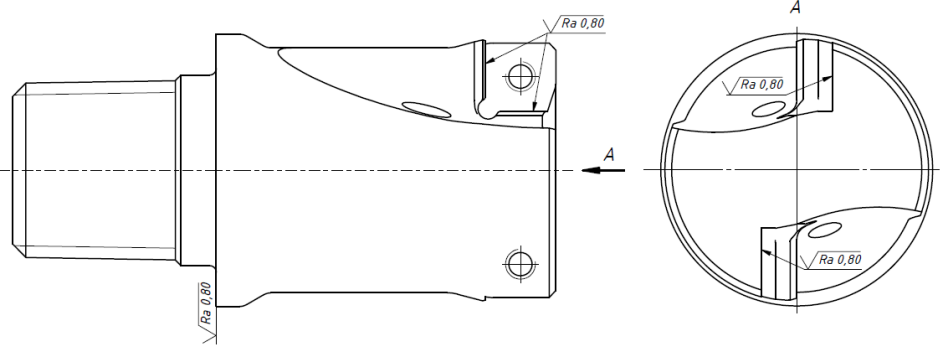
Продовження таблиці 3.2

№	Назва та зміст операції	Ескіз операції	Верстат, інструмент	Пристосування
015	<p><u>Багатоцільова</u> Фрезерування стружкових канавок, пазів під пластину. Свердління отворів на дні пазів. Нарізання різьби в отворах</p>		<p>П'ятиосьовий фрезерний верстат з ЧПК MSF1224-5х; фреза профільна, фреза кінцева для обробки пазів, свердла $\varnothing 2,5$ мм, $\varnothing 1,85$ мм, мітчик M2,2</p>	<p>Лещата верстатні прецизійні</p>

Продовження таблиці 3.2

№	Назва та зміст операції	Ескіз операції	Верстат, інструмент	Пристосування
015	Свердління отвору Ø2,5 мм		П'ятиосьовий фрезерний верстат з ЧПК MSF1224-5x; фреза профільна, фреза кінцева для обробки пазів, свердла Ø2,5 мм, Ø1,85 мм, мітчик M2,2	Лещата верстатні прецизійні
020	<u>Токарна з ЧПК</u> Точіння зовнішнього контуру. Нарізання конусної зовнішньої різьби Rc ¼ - ISO 7-1		Токарно-фрезерний верстат з ЧПК Gildemeister TWIN 42- ID16644; різець прохідний, різьбонарізна фреза	Патрон трьохкулачковий

Кінець таблиці 3.2

№	Назва та зміст операції	Ескіз операції	Верстат, інструмент	Пристосування
025	<u>Термічна</u> Термообробка (гартування, відпуск)	-	Піч для гартування	Щипці, захисний одяг
030	<u>Шліфувальна</u> Шліфування пазу під пластину і торця		Плоскошліфувальний верстат MAST Metalltechnik M-PS5025; плоский абразивний круг	Фіксатор з упором
035	<u>Контрольна</u> Контролювати розміри на відповідність кресленику	-	Штангенциркуль, нутромір, індикаторний вимірювач	Оправка

3.2 Розрахунок припусків на обробку

Механічна обробка — це завершальний етап технологічного процесу виготовлення деталі, під час якого забезпечуються необхідні геометричні розміри, точність форми та взаємного розташування елементів, а також якість обробленої поверхні. Однією з ключових складових проектування процесу обробки є правильне визначення припусків, які забезпечують усунення дефектів, шорсткості поверхні заготовки, а також компенсують можливі відхилення при попередніх переходах [33].

Припуск — це шар матеріалу, що видаляється з поверхні заготовки при обробці. Розрахунок припусків передбачає визначення їх величини для кожного перехідного етапу обробки. Розрахунок ведеться зверху вниз — від готового розміру до розміру на попередньому переході, додаючи величину припуску для кожної операції [33].

Розрахунок припусків проводимо на внутрішній посадковий діаметр фрези, розміром $\varnothing 20H6(+0,025)$ і шорсткістю $Ra\ 0,32$.

Обробка ведеться на обробному центрі Haas VP-5, а основним матеріалом є алюмінієвий сплав АК4 (EN AW-2024).

Механічна обробка заданого внутрішнього посадкового отвору складається з таких операцій та переходів:

- свердління (11 квалітет);
- чорнове розточування (9 квалітет);
- чистове розточування (6 квалітет);
- шліфування (6 квалітет).

Свердління (11 квалітет)

Якість поверхні після свердління за табл. 27 [33] для діапазону діаметрів 16...25 мм складає:

$$Rz = 25\ \text{мкм}, h = 0,8\ \text{мкм}.$$

Сумарні відхилення розташування будуть складатися з відхилення

уводу свердла $\Delta_{уВ}$ при свердлінні та зміщення осі отвору відносно номінального положення $\Delta_{зМ}$ [33]. Тоді:

$$\Delta_{уВ} = \Delta_{у} \cdot L, \quad (3.1)$$

де $\Delta_{у}$ – зміщення свердла при свердлінні, мкм/мм;

$L = 30$ мм – довжина отвору, згідно складеного технологічного процесу для операції 010 (див. табл. 3.1).

Величину $\Delta_{у}$ визначаємо за табл. 28 [33]. Для діапазону діаметра 18 мм ця величина дорівнює: $\Delta_{у} = 2$ мкм/мм. Тоді за формулою (3.1):

$$\Delta_{уВ} = \Delta_{у} \cdot L = 2 \cdot 30 = 60 \text{ мкм.}$$

За цією ж табл. 28 [33] визначаємо: $\Delta_{зМ} = 30$ мкм.

Сумарного відхилення при найгіршому варіант, тобто коли величини $\Delta_{уВ}$ та $\Delta_{зМ}$ співпадають за напрямком:

$$\Delta = \Delta_{уВ} + \Delta_{зМ} = 60 + 30 = 90 \text{ мкм.}$$

Похибка установки при закріпленні в патроні за табл. 13 [33] для діапазону зовнішніх діаметрів деталі 36...50 мм в радіальному напрямку складає: $\varepsilon = 15$ мкм (беремо як для прутка гарячекатаного підвищеної точності).

Чорнове розточування (9 квалітет)

Якість поверхні при чорновому розточуванні за табл. 5 [33] складає:

$$Ra = 2,5 \text{ мкм}, h = 0,7 \text{ мкм.}$$

Для переведення параметра шорсткості Ra в Rz скористаємось табл. 21.4 [45]. Тоді маємо: $Rz = 4 \cdot Ra = 4 \cdot 2,5 = 10$ мкм.

Остаточню приймаємо $Rz = 10$ мкм.

Сумарним відхиленням розташування нехтуємо [45].

Похибку установки як і для попередньої операції знаходимо за табл. 13 [33] і вона складає: $\varepsilon = 8$ мкм (обираємо відповідно як для заготовки із вже обробленою базою, для діапазону діаметрів бази 36...50 мм).

Чистове розточування (6 квалітет)

Якість поверхні при чистовому розточуванні за табл. 5 [33] складає:

$$Ra = 0,32 \text{ мкм}, h = 0,2 \text{ мкм}.$$

Переведемо параметра шорсткості Ra в Rz : $Rz = 4 \cdot Ra = 4 \cdot 0,32 = 1,38 \text{ мкм}$.

Приймаємо $Rz = 1,3 \text{ мкм}$.

Сумарним відхиленням розташування нехтуємо.

Похибка установки складатиме: $\varepsilon = 5 \text{ мкм}$.

Шліфування (6 квалітет)

Якість поверхні при шліфуванні за табл. 5 [33] складає:

$$Ra = 0,32 \text{ мкм}, h = 0,15 \text{ мкм}.$$

Переведемо параметра шорсткості Ra в Rz :

$$Rz = 4 \cdot Ra = 4 \cdot 0,32 = 1,28 \text{ мкм}.$$

Приймаємо: $Rz = 1,3 \text{ мкм}$.

Сумарним відхиленням розташування нехтуємо.

Похибка установки складатиме: $\varepsilon = 3 \text{ мкм}$.

Величини мінімальних припусків для переходів розраховуємо за формулою (21.3) [33]:

$$2z_{min} = 2 \left(Rz_{i-1} + h_{i-1} + \sqrt{\Delta_{i-1}^2 + \varepsilon_i^2} \right)$$

де i – номер переходу;

$z_{min i}$ – величина мінімального проміжного пропуску для даного переходу;

Rz_{i-1} – висота мікронерівностей на попередньому переході;

h_{i-1} – глибина дефектного поверхневого шару на попередньому переході;

Δ_{i-1} – сумарне відхилення просторових відхилень поверхні на попередньому переході;

ε_i – похибка установки заготовки на даному переході.

Тоді

$$2z_{\text{чорн розт min}} = 2 (25 + 0,8 + \sqrt{90^2 + 8^2}) = 232 \text{ мкм}$$

$$2z_{\text{чист розт min}} = 2 (10 + 0,7 + \sqrt{0^2 + 5^2}) = 31,4 \text{ мкм}$$

$$2z_{\text{шліф min}} = 2 (1,3 + 0,2 + \sqrt{3^2}) = 9 \text{ мкм}$$

Отримані розраховані значення заносимо до табл. 3.2. У відповідності до методики, викладеної в пп. 21.1-21.2 [33], визначаємо всі граничні міжперехідні розміри та припуски заготовки.

Визначаємо допуски на виготовлення IT_D для діаметру отвору $\emptyset 20$ мм згідно табл. А.2 [34]:

- свердління (11 кв.): $IT_D = 270$ мкм;
- розточування чорнове (9 кв.): $IT_D = 87$ мкм;
- розточування чистове (6 кв.): $IT_D = 13$ мкм;
- шліфування (6 кв.): $IT_D = 13$ мкм.

Таблиця 3.2 – Результати розрахунку припусків на механічну обробку та міжперехідних розмірів

Технологічні операції та переходи обробки поверхні	Rz_{i-1}	h_{i-1}	Δ_{i-1}	ϵ_i	Розрахований припуск $2z_{\text{min}i}$, мкм	Розрахований розмір $D_{\text{max}i}$, мм	Допуск на виготовлення IT_{Di} , мкм	Прийняті розміри $D_{\text{max}i}$, мм	Прийняті розміри $D_{\text{min}i}$, мм	$2Z_{\text{max}i}$, мкм	$2Z_{\text{min}i}$, мкм
Свердління	25	0.8	90	8	232.3	20,765	270	20,765	20,495	270	
Чорнове розточування	10	0.7	—	5	31.4	20,495	87	20,495	20,408	87	31.4
Чистове розточування	1,3	0.2	—	3	9.0	20,408	13	20,408	20,395	13	9.0
Шліфування						20,395	13	20,395	20,382	13	

Далі, за даною методикою записуємо для останнього переходу в графу

«Розрахунковий розмір» найбільший граничний розмір деталі за кресленням. Це відповідає розміру $\varnothing 20H6$ мм, тобто $D_{max} = 20 + 0,013 = 40,013$ мм.

Для визначення розрахункових розмірів на попередніх переходах, потрібно відняти від найбільшого граничного розміру за кресленням розрахованого припуску $2z_{min i}$. Тобто для кожного переходу він розраховується наступним чином:

- при розточуванні чистовому:

$$D_{max i - 1} = D_{max i} - 2z_{min i}$$

$$D_{max i - 1} = 40,013 - 0,009 = 20,004 \text{ мм};$$

- при розточуванні чорновому:

$$D_{max i - 1} = D_{max i} - 2z_{min i}$$

$$D_{max i - 1} = 20,004 - 0,0314 = 19,973 \text{ мм};$$

- при свердлінні:

$$D_{max i - 1} = D_{max i} - 2z_{min i}$$

$$D_{max i - 1} = 19,973 - 0,2323 = 19,741 \text{ мм}.$$

Далі визначаємо найбільші граничні розміри $D_{max i}$ для кожного переходу, округляючи їх до знаку десяткового дробу. Найменші граничні розміри $D_{min i}$

визначаємо шляхом віднімання допуску від заокругленого найбільшого граничного розміру $D_{max i}$. Тобто:

- при свердлінні:

$$D_{max i} \approx 19,8 \text{ мм},$$

$$D_{min i} = D_{max i} - IT_{Di}$$

$$D_{min i} = 19,8 - 0,270 = 19,53 \text{ мм};$$

- при розточуванні чорновому:

$$D_{max i} \approx 20,0 \text{ мм},$$

$$D_{min i} = D_{max i} - IT_{Di}$$

$$D_{min i} = 20,0 - 0,087 = 19,913 \text{ мм};$$

- при розточуванні чистовому:

$$D_{max i} \approx 20,0 \text{ мм},$$

$$D_{min i} = D_{max i} - IT_{Di}$$

$$D_{min i} = 20,0 - 0,013 = 19,987 \text{ мм};$$

– при шліфуванні:

$$D_{max i} = 20,013 \text{ мм},$$

$$D_{min i} = D_{max i} - IT_{Di}$$

$$D_{min i} = 20,013 - 0,013 = 20,000 \text{ мм}.$$

Останнім кроком розраховуємо граничні значення припусків $2z_{max i}$ як різницю найменших граничних розмірів $D_{min i}$, а $2z_{min i}$ як різницю найбільших граничних розмірів $D_{max i}$ даного та попереднього переходів.

Тобто:

– при розточуванні чорновому:

$$2z_{max i} = D_{min i} - D_{min i - 1}$$

$$2z_{max i} = 19,913 - 19,53 = 0,383 \text{ мм} = 383 \text{ мкм};$$

$$2z_{min i} = D_{max i} - D_{max i - 1}$$

$$2z_{min i} = 20,0 - 19,8 = 0,2 \text{ мм} = 200 \text{ мкм};$$

– при розточуванні чистовому:

$$2z_{max i} = D_{min i} - D_{min i - 1}$$

$$2z_{max i} = 19,987 - 19,913 = 0,074 \text{ мм} = 74 \text{ мкм};$$

$$2z_{min i} = D_{max i} - D_{max i - 1}$$

$$2z_{min i} = 20,0 - 20,0 = 0,000 \text{ мм} = 0 \text{ мкм};$$

– при шліфуванні:

$$2z_{max i} = D_{min i} - D_{min i - 1}$$

$$2z_{max i} = 20,000 - 19,987 = 0,013 \text{ мм} = 13 \text{ мкм};$$

$$2z_{min i} = D_{max i} - D_{max i - 1}$$

$$2z_{min i} = 20,013 - 20,0 = 0,013 \text{ мм} = 13 \text{ мкм}.$$

Всі отримані значення заносимо до табл. 3.2.

Проведемо перевірку правильності розрахунків. Згідно методики, викладеною в підрозділі 21.2 [33], пункті 12, має виконуватись умова:

$$\sum 2z_{\max i} - \sum 2z_{\min i} = IT_{\text{заг}} - IT_{\text{дет}};$$

$$\sum 2z_{\max i} = 383 + 74 + 13 = 470$$

$$\sum 2z_{\min i} = 200 + 0 + 13 = 213$$

$$470 - 213 = 257$$

$$IT_{\text{заг}} = 270 ; IT_{\text{дет}} = 13$$

$$257 = 257$$

Отже, умова виконується і розрахунок припусків виконано вірно.

Після цього побудуємо схему розташування припусків та міжперехідних розмірів для заданої внутрішньої поверхні $\varnothing 20H6$ (рис. 3.1).

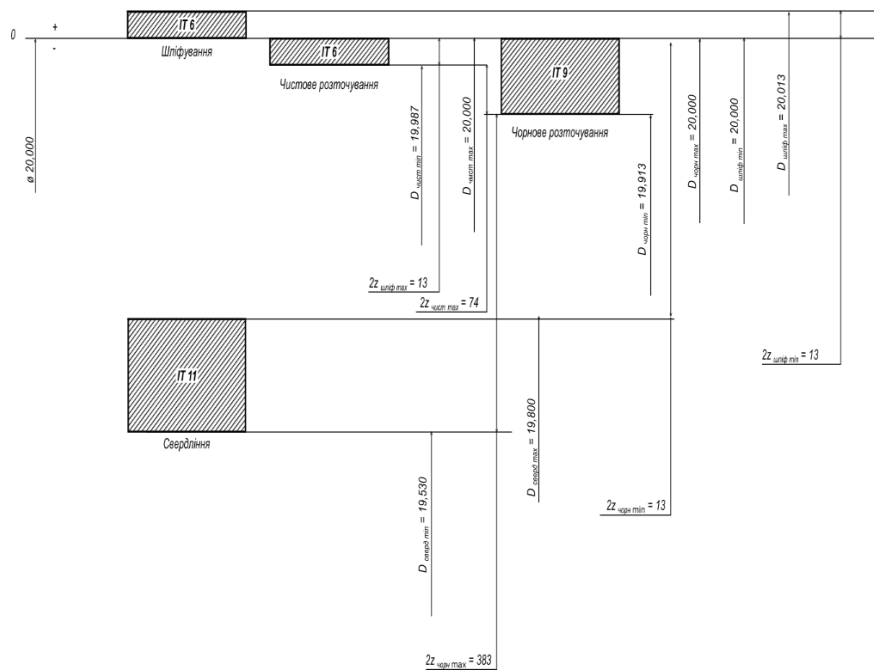


Рисунок 3.1 – Схема розташування припусків та міжперехідних розмірів для поверхні $\varnothing 20 H6$

3.3 Розрахунок режимів різання технологічної операції

Розрахунок режимів різання буде виконуватися для операції 010 Токарна згідно технологічного процесу виготовлення корпусу фрези (див. табл. 3.1).

Подальші розрахунки будемо виконувати за методикою, викладеною в [35].

Матеріал заготовки – сталь 40Х, який характеризується високою міцністю і гарною оброблюваністю. Задана шорсткість обробленої поверхні – $Ra = 0,32$ мкм, що відповідає напівчистовому фрезеруванню з високими вимогами до точності та якості поверхні.

Операція 010 Токарна складається з таких переходів:

- підрізання торця ;
- точіння зовнішньої циліндричної поверхні;
- Точіння торцевої виїмки

Дана операція виконується на Токарний верстат з ЧПК MAST ML 500x1000 SH8; різці типу 1,5; Основні характеристики цього верстату, згідно [37], представлені у табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Технічні характеристики верстату з ЧПК MAST ML 500x1000 SH8 [37]

Параметри	Величини/розміри
Потужність головного приводу	до 7,5кВт
Конус шпинделя	ISO 40 / DIN 69871
Інструментальний магазин	8 позицій (револьверна головка)
Максимальні переміщення по осях (X / Y / Z)	260 мм / - мм / 1000 мм

Кінець таблиці 3.3

Параметри	Величини/розміри
Система охолодження	Центральна подача ЗОР, насос, бак
Максимальна швидкість подачі	до 8000 мм/хв
Тип обробки	Точіння (зовнішнє, внутрішнє, торцеве)

Окрім того, застосування твердосплавних пластин і система ЧПК дозволяють реалізувати оптимальні режими різання, рекомендовані для обробки алюмінію, що позитивно впливає на якість поверхні та зносостійкість інструменту.

Матеріал заготовки – сталь 40Х, границя міцності – $\sigma_B = 1000$ МПа. [38]

Режими різання для кожного переходу в межах даної операції визначаються послідовно за логікою: глибина різання \rightarrow подача \rightarrow швидкість. Спочатку обирають глибину різання t , далі визначають подачу S , після чого обчислюють швидкість різання V . Методика розрахунку базується на підходах, викладених у [35].

Підрізання торця:

Різальний інструмент – прохідний упорний різець T-Max P DVJNR 2020K 16 з пластиною VNMG 16 04 04-MF 4425. Токарний самоцентруючий трьохкулачковий патрон DIN 6350. Матеріал різальної пластини – твердий сплав. Головний кут в плані різця – $\varphi = 95^\circ$ [39].

Швидкість різання розраховуємо за формулою (5.1) [35]:

$$V_{\text{різ.}} = \frac{C_V}{T^{m \cdot t^x \cdot S^y}} \cdot K_V \quad (3.2)$$

де C_V – довідковий коефіцієнт для сталі 40Х з твердосплавним інструментом [1]

$$C_V = 300;$$

T – період стійкості інструменту, хв. Для пластин з твердого сплаву він знаходиться $T = 60$ хв;

t – глибина різання, мм.

S – подача, мм/об.

m, x, y – показники степеня. Згідно табл. Б.7 [36] приймаємо $m = 0,2$,
 $x = 0,15$, $y = 0,20$

K_V – коригуючий коефіцієнт.

Коригуючий коефіцієнт визначається за формулою (5.3) [35]:

$$K_V = K_{mv} \cdot K_{pv} \cdot K_{iv} \cdot K_\varphi \cdot K_r, \quad (3.3)$$

- де K_{mv} – коефіцієнт, що враховує вплив матеріалу заготовки;
- $K_{pv} = 1,05$ – коефіцієнт, що враховує стан поверхні заготовки (див. табл. Б.9 [35]);
- $K_{iv} = 1,0$ – коефіцієнт, що враховує матеріал різальної частини різця (див. табл. Б.10 [35]);
- $K_\varphi = 0,95$ – коефіцієнт, що враховує головний кут в плані різця (див. табл. Б.11 [35]);
- $K_r = 0,95$ – коефіцієнт, що враховує величину радіуса при вершині різця (береться до уваги тільки для різців із швидкорізальної сталі).

Коефіцієнт K_{mv} при обробці сталей розраховується за формулою (5.4) [35]:

$$K_{mv} = \left(\frac{980}{\sigma_B} \right)^{n_v} = \left(\frac{980}{1000} \right)^1 = 0,98$$

де $n_v = 1$ – показник степеня (див. табл. Б.8 [35]);

$\sigma_B = 1000$ МПа – границя міцності сталі 40.

Тоді за формулою (3.3) сумарний коригуючий коефіцієнт дорівнює:

$$K_V = K_{mv} \cdot K_{pv} \cdot K_{iv} \cdot K_\varphi \cdot K_r = 0,98 \cdot 1,05 \cdot 1,0 \cdot 0,95 \cdot 0,95 = 0,98$$

Отже, визначаємо швидкість різання за формулою (3.2):

$$V_{\text{різ.}} = \frac{C_V}{T^m \cdot t^x \cdot S^y} \cdot K_V$$

$$V_{\text{різ.}} = \frac{300}{60^{0,2} \cdot 0,7^{0,15} \cdot 0,29^{0,2}} \cdot 0,92 = 164,5 \text{ м/хв}$$

Визначаємо розрахункову частоту обертання шпинделя за формулою (5.7) [35]:

$$n = \frac{V \cdot 1000}{\pi \cdot D_0} \quad (3.4)$$

де $D_0 = 43$ мм – діаметр заготовки до обробки;

$$n = \frac{164,5 \cdot 1000}{\pi \cdot 43} = 1217 \text{ об/хв,}$$

Розраховуємо основний технологічний час. Це час у хвиликах, що витрачається безпосередньо для зняття заданого припуску [35]. Він визначається за формулою (5.16) [35]:

$$T_0 = \frac{L}{n \cdot S} \cdot i$$

$$T_0 = \frac{1,5}{0,29 \cdot 1217} \cdot 60 = 0,255 \text{ хв}$$

Наступним етапом буде чорнове точіння:

$t = 0,9$ мм, $S = 0,29$ мм/об, $D = 22$ мм, $L = 25$ мм;

Визначаємо швидкість різання чорнового точіння за формулою (3.2):

$$V_{\text{різ. чорн}} = \frac{C_V}{T^m \cdot t^x \cdot S^y} \cdot K_V$$

$$V_{\text{різ. чорн}} = \frac{300}{60^{0,2} \cdot 0,9^{0,15} \cdot 0,29^{0,2}} \cdot 0,92 = 158,4 \text{ м/хв}$$

Частота обертання:

$$n_{\text{чорн}} = \frac{V_{\text{різ. чорн}} \cdot 1000}{\pi \cdot D_0}$$

$$n_{\text{чорн}} = \frac{158,4 \cdot 1000}{\pi \cdot 22} = 2291 \text{ об/хв,}$$

Технологічний час:

$$T_{0 \text{ чорн}} = \frac{25}{0,29 \cdot 2291} \cdot 60 = 2,26 \text{ хв}$$

Цей перехід виконується після попереднього чорнового точіння та має на меті забезпечити точну геометричну форму і задану шорсткість поверхні ($Ra \leq 0,32 \text{ мкм}$), відповідно до вимог технічного завдання. Після зняття основного припуску на попередньому етапі, на поверхні заготовки залишається невеликий шар металу — саме він знімається під час чистової обробки.

$$t = 1,6 \text{ мм}, S = 0,30 \text{ мм/об}, D = 20 \text{ мм}, L = 25 \text{ мм};$$

Визначаємо швидкість різання чистового точіння за формулою (3.2):

$$V_{\text{різ. чист}} = \frac{C_V}{T^m \cdot t^x \cdot S^y} \cdot K_V$$

$$V_{\text{різ. чист}} = \frac{300}{60^{0,2} \cdot 1,6^{0,15} \cdot 0,3^{0,2}} \cdot 0,92 = 144,3 \text{ м/хв}$$

Визначаємо розрахункову частоту обертання шпинделя за формулою (5.7) [35]:

$$n_{\text{чист}} = \frac{144,3 \cdot 1000}{\pi \cdot 20} = 2296 \text{ об/хв},$$

Технологічний час:

$$T_{0 \text{ чист}} = \frac{25}{0,30 \cdot 2296} \cdot 60 = 2,18 \text{ хв}$$

Останнім етапом буде торцева виїмка:

$$t = 1,0 \text{ мм}, S = 0,10 \text{ мм/об}, D = 13 \text{ мм}, L = 1,0 \text{ мм};$$

$$V_{\text{різ. точ.}} = \frac{300}{60^{0,2} \cdot 1,0^{0,15} \cdot 0,10^{0,2}} \cdot 0,92 = 192,9 \text{ м/хв}$$

Визначаємо розрахункову частоту обертання шпинделя за формулою (5.7) [35]:

$$n_{\text{точ.}} = \frac{192,9 \cdot 1000}{\pi \cdot 13} = 4723 \text{ об/хв},$$

Це майже вдвічі перевищує стандартну межу ($n \leq 2500 \text{ об/хв}$)

Технологічний час:

$$T_{0 \text{ точ.}} = \frac{1,0}{0,10 \cdot 4723} \cdot 60 = 0,13 \text{ хв}$$

Режими різання для решти переходів токарної операції розраховуємо за аналогією, а отриманні значення заносимо у табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати розрахунку режимів різання для токарної операції

Назва операції	Перехід	№ інструм.	t, мм	S, мм/об	V, м/хв	n, об/хв	T ₀ , хв
Підрізання торця	1	1	0,70	0,29	164,5	1217	0,25
Точіння зовнішньої циліндричної поверхні (чорнове)	2	2 (чорн.)	0,90	0,29	158,4	2291	2,26
Точіння зовнішньої циліндричної поверхні (чистове)	2	1 (чист.)	1,60	0,30	144,3	2296	2,18
Точіння торцевої канавки	3	3	1	0,10	100	2450	0,24
Точіння зовнішньої цил. пов. (чист.)	1	1 чист	0,3	0,15	213,1	1785	5,6
Точіння зовнішньої цил. пов. (чорн.)	1	2 чорн	1,2	0,3	150,7	1199	4,17
Точіння конічної пов. (чист.)	2	1 чист	0,3	0,15	213,1	3391	1,18
Точіння конічної пов. (чорн.)	2	2 чорн	1	0,25	160,6	2323	1,03
Нарізання конусної різьби	3	3	0,5	0,1	214	3585	1
Зняття фаски	4	4	0,3	0,1	213,1	2829	0,42
Зняття фаски на торці	5	1	0,2	0,15	221,7	4412	0,2
Фрезерування стружкових канавок	1	1	0,50	0,2	249,7	2650	1,36
Фрезерування пазів під пластину	2	2	1	0,12	235	6233	1,20
Свердління отворів Ø1.85 мм	3	3	5,5	0,04	40	6233	0,03
Нарізання різьби М2.2	4	4	5,5	0,45	10	600	0,1
Свердління отвору Ø2.5 мм	5	5	22,11	0,06	30	3820	0,3

Отримані значення використовуються для заповнення операційної карти (див. табл. Г.2) та на листі графічного зображення технологічного процесу токарної операції (додаток Г).

3.4 Визначення зміщення осі гвинта відносно осі різальної пластинки

Як уже зазначалося, осі різальної пластини та гвинта, що притискає її до корпусу фрези, не збігаються. Між ними існує певне взаємне зміщення, яке забезпечує надійну фіксацію пластини в заданому положенні.

Розрахуємо дану відстань.

Вихідними даними для визначення ексцентриситету ϵ :

- Пластина Sandvik 880-03 03 W06H-P-LM H13A;
- Гвинт Sandvik 5513 020-33

Параметри, котрі будуть використовуватись для розрахунків, різьбового отвору в корпусі фрези M2,2-6H (довжина 5 мм) [40]

- $P = 0,45$ мм – (стандартний для M2,2);
- $T_{D_1} = 1,95$ мм – допуск внутрішнього діаметру;
- $T_{D_2} = 2,075$ мм – допуск середнього діаметру;
- $EI_D = EI_{D_1} = EI_{D_2} = 0$ – основні відхилення.

Параметри, котрі будуть використовуватись для розрахунків, вище зазначеного гвинта [40]:

- $P = 0,45$ мм;
- $T_{d_1} = 2,175$ мм – допуск зовнішнього діаметру;
- $T_{d_2} = 2,025$ мм – допуск середнього діаметру;
- $es_d = es_{d_1} = es_{d_2} = -0,10$ мм – основні відхилення.

Параметри, котрі будуть використовуватись для розрахунків, вище зазначеної різальної пластини:

- $d = 6 \pm 0,05$ мм – діаметр вписаного кола;
- $\epsilon = 90^\circ$ – кут при вершині пластинки;

- $s = 2,60 \pm 0,05$ мм – товщина пластинки;
- $d_1 = 2,50 \pm 0,02$ мм – діаметр отвору пластинки

Зміщення осі гвинта відносно осі різальної пластинки включає наступні складові:

- Зміщення за рахунок зміни діаметру вписаного кола пластини A_1 ;
- Зміщення за рахунок зміни діаметру d_1 кріпильного отвору A_2 ;
- Зміщення за рахунок відхилення від симетричності отвору відносно задніх поверхонь A_3 ;
- Зміщення за рахунок відхилення розміру l від бічної сторони гнізда до осі кріпильного отвору A_4 ;
- Зміщення за рахунок зазору в різбовому з'єднанні гвинта і різбового отвору в корпусі A_5 ;
- Зміщення за рахунок відхилення від співвісності головки гвинта відносно осі його різьби A_6

Визначимо всі складові зміщення осі гвинта відносно осі різальної пластинки.

Цю складову, позначену як A_1 , розраховують за наступною формулою:

$$A_1 = \frac{T_d}{2 \cos\left(90^\circ - \frac{\varepsilon}{2}\right)} \quad (3.5)$$

де, $T_d = 0,05$ мм – допуск на діаметр вписаного кола.

Отже, дане зміщення буде рівне:

$$A_1 = \frac{0,05}{2 \cos(45^\circ)} = 0,03 \text{ мм}$$

Зміщення за рахунок зміни діаметру d_1 кріпильного отвору A_2 визначається за наступною формулою:

$$A_2 = \frac{T_{d_1}}{2} \quad (3.6)$$

де, $T_{d_1} = 0,02$ мм – допуск на діаметр отвору пластинки.

Отже, дане зміщення буде рівне:

$$A_2 = \frac{0,02}{2} = 0,01 \text{ мм}$$

Зміщення за рахунок відхилення від симетричності отвору відносно задніх поверхонь A_3 визначається за формулою:

$$A_3 = \frac{TPS}{2} \quad (3.7)$$

де, $TPS = 0,03$ мм – Це типове значення для пластин дрібного типорозміру відповідно до ISO 13715, клас точності — середній [40].

Отже, дане зміщення буде рівне:

$$A_3 = \frac{0,03}{2} = 0,015 \text{ мм}$$

Зміщення за рахунок відхилення розміру l від бічної сторони гнізда до осі кріпильного отвору A_4 визначається за формулою:

$$A_4 = \frac{T_l}{2 \cos\left(90^\circ - \frac{\varepsilon}{2}\right)} \quad (3.8)$$

де, $T_l = \frac{Td}{2} = 0,025$ мм – допуск за 14-им квалітетом для розміру l від бічної сторони гнізда до осі отвору. Отже, дане зміщення буде рівне:

$$A_4 = \frac{0,025}{2 \cos(45^\circ)} = 0,017$$

Зміщення за рахунок зазору в різьбовому з'єднанні гвинта і різьбового отвору в корпусі A_5 визначається за формулою:

$$A_5 = \frac{S_{D_2}^{mas}}{2} \quad (3.9)$$

де, $S_{D_2}^{mas}$ – найбільший зазор за середнім діаметром. Найбільший зазор за середнім діаметром $S_{D_2}^{mas}$ визначається за формулою:

$$S_{D_2}^{max} = ES_{D_2} - ei_{d_2} = (EI_{D_2} - T_{D_2}) - (es_{d_2} - T_{d_2})$$

$$S_{D_2}^{max} = (0 + 0,05) - (-0,10 + 0,05) = 0,10 \text{ мм}$$

Отже, дане зміщення буде рівне:

$$A_5 = \frac{0,10}{2} = 0,05 \text{ мм}$$

Зміщення за рахунок відхилення від співвісності головки гвинта відносно осі його різьби A_6 визначається за формулою:

$$A_6 = \frac{TPC}{2} \quad (3.10)$$

де, $TPC = 0,04$ мм – для гвинтів діаметром до 3 мм.

Отже, дане зміщення буде рівне:

$$A_6 = \frac{0,04}{2} = 0,02 \text{ мм}$$

Всі складові значення зміщення визначено.

Розрахуємо сумарну величину зміщення в радіальному вираженні за методом повної взаємозамінності за формулою:

$$A = \sum_{i=6} A_i = 0,03 + 0,01 + 0,015 + 0,017 + 0,05 + 0,02 = 0,14 \text{ мм} \quad (3.11)$$

Розрахуємо сумарну величину зміщення в радіальному вираженні за ймовірнісним методом за формулою:

$$A = \sqrt{\frac{(0,5T_d)^2}{\cos\left(90^\circ - \frac{\varepsilon}{2}\right)} + \left(\frac{T_{d_1}}{2}\right)^2 + \left(\frac{TPS}{2}\right)^2 + \frac{(0,5T_l)^2}{\cos\left(90^\circ - \frac{\varepsilon}{2}\right)} + \left(\frac{S_{D_2}^{mas}}{2}\right)^2 + \left(\frac{TPC}{2}\right)^2}$$

$$A = \sqrt{\frac{(0,025)^2}{\cos(45^\circ)} + (0,01)^2 + (0,015)^2 + \frac{(0,0125)^2}{\cos(45^\circ)} + (0,05)^2 + (0,02)^2}$$

$$\approx 0,065 \text{ мм}$$

Для підтвердження правильності виконаних розрахунків доцільно провести перевірку граничних умов. Це дозволить визначити номінальне значення зміщення осі різальної пластини відносно осі гвинта та оцінити його відповідність допустимим значенням.

Перша гранична умова:

Найменше зміщення осі гвинта A_{min} повинне бути більшим за сумарне значення. Нерівність має наступний вигляд:

$$A_{min} > A \quad (3.12)$$

Ця умова забезпечує наявність контакту різальної пластини як з бічними поверхнями корпусу фрези, так і з головкою кріпильного гвинта, запобігаючи їх роз'єднанню під час роботи.

Друга гранична умова:

Найбільше зміщення осі гвинта A_{max} у напрямку кута гнізда під різальну пластину не повинно перевищувати різницю між радіусами отвору в пластині та самого гвинта. Це дозволяє зберегти мінімально необхідний зазор між циліндричною поверхнею отвору пластини та зовнішнім діаметром гвинта. Відповідна нерівність має такий вигляд:

$$A_{max} < \frac{d_{1min} - d_{max}}{2} \quad (3.13)$$

де, d_{1min} – найменший граничний розмір кріпильного отвору різальної пластинки;

$d_{гвmax}$ – найбільший граничний розмір зовнішнього діаметру гвинта.

Найменший граничний розмір кріпильного отвору різальної пластинки d_{1min} визначається за формулою:

$$d_{1min} = d_1 + ei_{d_1} \quad (3.14)$$

де, $ei_{d_1} = -0,02$ мм – нижнє відхилення діаметру отвору різальної пластинки.

Отже, найменший граничний розмір кріпильного отвору різальної пластинки d_{1min} буде рівним:

$$d_{1min} = 2,5 + (-0,02) = 2,48 \text{ мм}$$

Найбільший граничний розмір зовнішнього діаметру гвинта $d_{гвmax}$ визначається за формулою:

$$d_{гвmax} = d + es_{d_1} = 2,20 + (-0,10) = 2,10 \text{ мм}$$

Можемо тепер перевірити нерівність:

$$A_{max} < \frac{2,45 - 2,10}{2} = 0,19 \text{ мм}$$

Отже, номінальний розмір зміщення осі гвинта має бути в наступних межах:

$$A_{min} < A_H < A_{max} \quad (3.15)$$

Нерівність за методом повної взаємозамінності:

$$0,14 < A_H < 0,19 \text{ – Умова виконується}$$

Нерівність за ймовірнісним методом:

$$0,065 < A_H < 0,19 \text{ – Умова виконується}$$

Виконано детальний розрахунок зміщення осі гвинта відносно осі різальної пластини. Розглянуто шість основних чинників, що впливають на ексцентриситет: допуски на геометричні параметри пластини та гвинта, симетричність елементів, зазори в різьбовому з'єднанні, а також відхилення співвісності.

Отже, приймаємо значення зміщення осі гвинта відносно осі різальної пластинки рівним $A_H = 0,15_{-0,08}^{+0,04}$ мм

3.5 Розробка керуючої програми для обробки фрези на верстаті з ЧПК

Створимо керуючу програму для виготовлення фрези, а саме для операції 010 Токарна з ЧПК. В якості вихідних даних використовуватимемо розроблену раніше технологію виготовлення головки фрези (табл. 3.2) та виконані розрахунки режимів різання (розділ 3.3). Для розробки керуючої програми оптимальним вибором є сучасна САМ-система Autodesk Fusion 360, що надає комплексний інструментарій для моделювання, створення технологічних операцій та автоматизованої генерації ЧПК-коду.

Робота розпочинається зі створення ескізу операції 010 Токарна з ЧПК у середовищі «Design» відповідно до технології виготовлення, а після – твердого тіла обертання деталі (рис. 3.2).

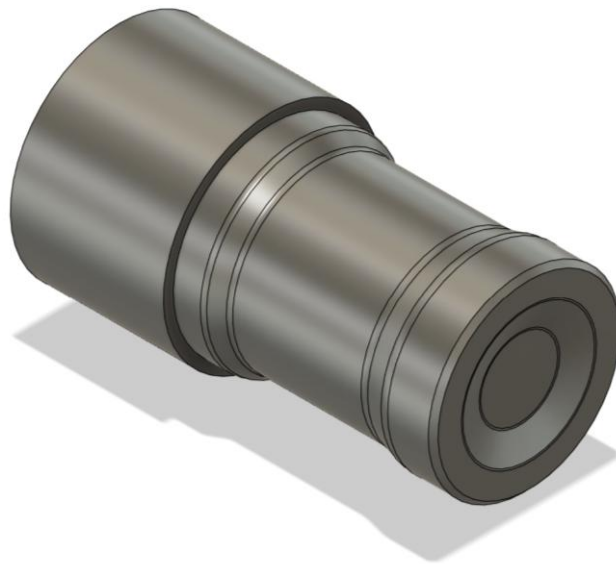


Рисунок 3.2 – Тривимірне зображення деталі, побудованої в Autodesk Fusion 360 відповідно до ескізу операції 010 Токарна з ЧПК

Після завершення побудови 3D-моделі переходимо до середовища «Manufacture» та створюємо новий проєкт (Setup), обравши тип операції — токарна. В якості верстату приймаємо з наявної бібліотеки Brother SPEEDIO M140X1 (рис. 3.3). У зв'язку з відсутністю відповідної 3D-моделі прийнятого за документацією верстата у бібліотеці Fusion 360, симуляцію проведено у режимі без заданої машини. Деталь закріплюється у токарному трьохкулачковому самоцентрувальному патроні діаметром 125 мм (ISO 702-3 №4). Задаємо параметри заготовки – циліндричний пруток діаметром 22 мм і довжиною 43 мм, матеріал – конструкційна легована сталь 5140 AISI (рис. 3.4).

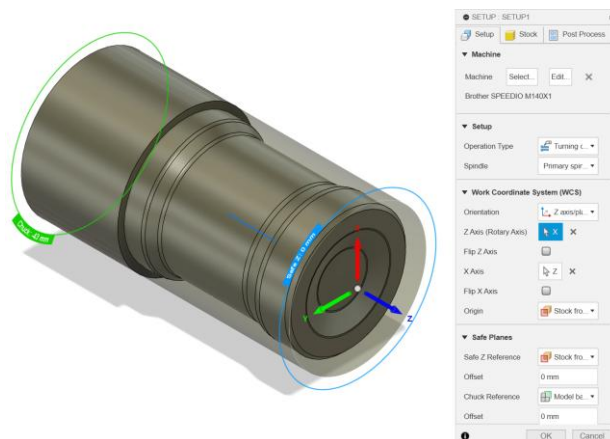


Рисунок 3.3 – Вікно створення нового проєкту (токарна обробка)

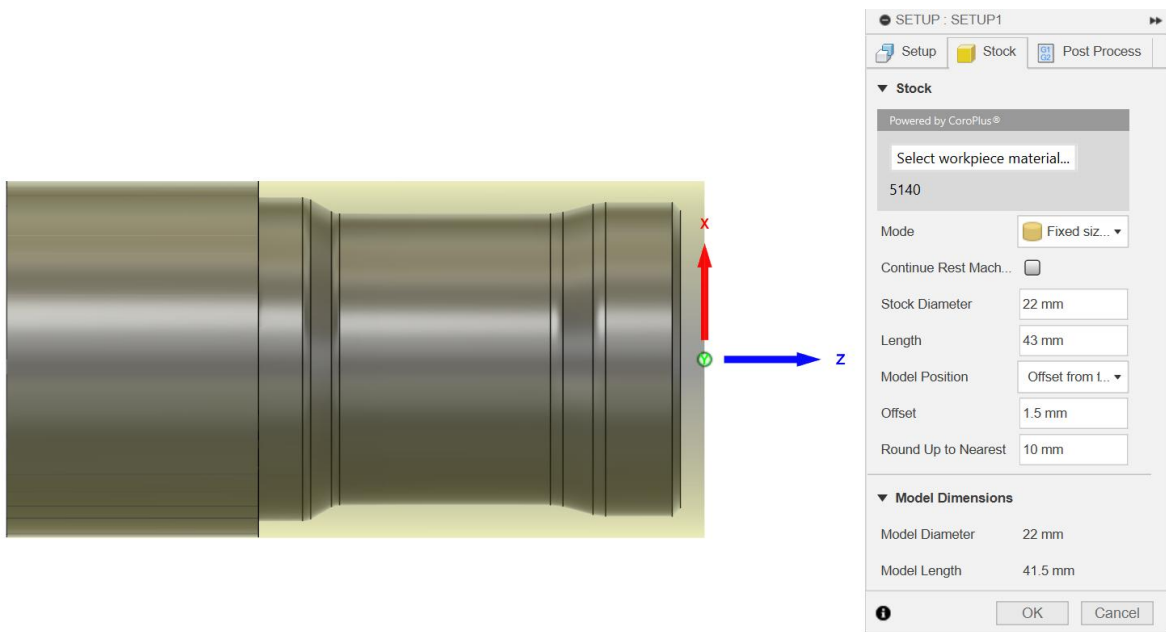


Рисунок 3.4– Вікно задання розмірів та матеріалу заготовки

Операція 010 Токарна з ЧПК включає в себе чотири основні переходи: підрізання торця, точіння зовнішнього контуру начорно та начисто, а також точіння торцевої конусної канавки. Розпочинаємо з першого переходу — підрізання торця. Для цього у вкладці «Turning» обираємо «Turning Face». Для того, щоб створити перехід, потрібно задати інструмент (Tool) та межі оброблення (на вкладці Geometry), решту програма визначить автоматично. Щоб уникнути небажаної обробки певних поверхонь, можна скористатися функцією «Groove Suppression» — вона дозволяє виключити ділянки, які не повинні оброблятися на цьому етапі. Як приклад, на рисунку 3.5 представлено вікно створення переходу для підрізання торця із призначеним за операційною картою інструментом.

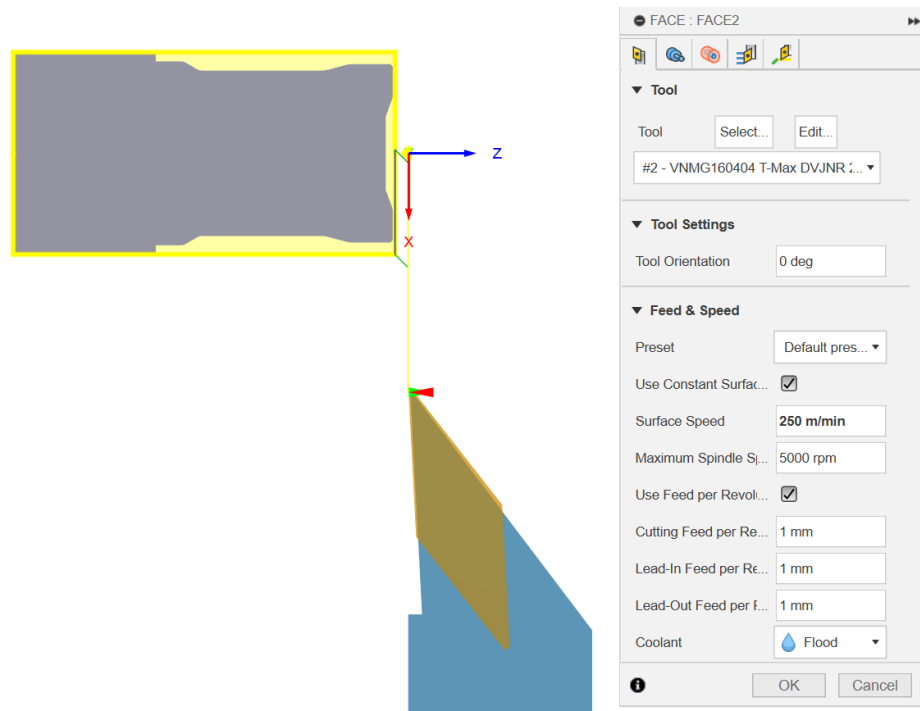


Рисунок 3.5 – Вікно створення операції підрізання торця

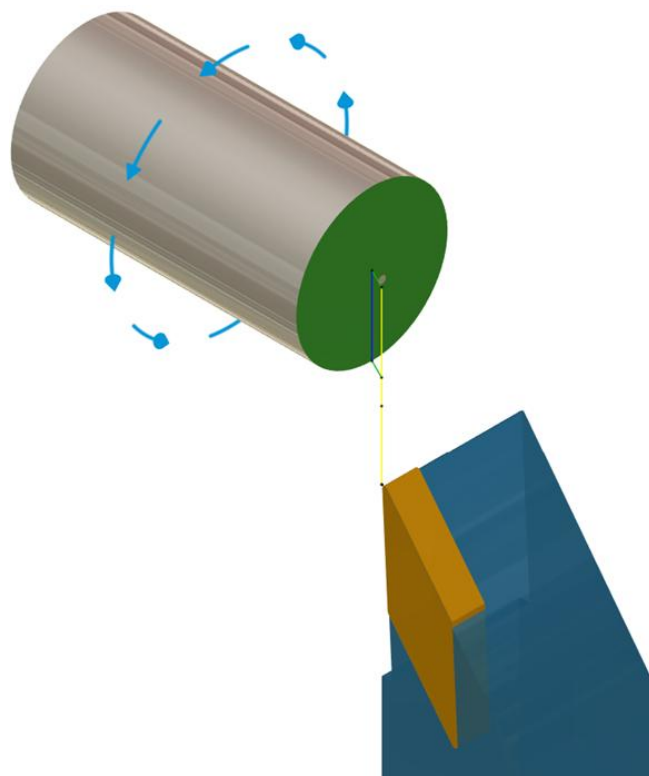


Рисунок 3.6 – Тривимірне зображення операції підрізання торця

Оскільки стандартна бібліотека інструментів у Fusion 360 є досить обмеженою, було прийнято рішення створити власні (кастомні) токарні різці, геометричні параметри яких відповідають інструментам, зазначеним в операційній карті. Це дозволяє забезпечити максимальну відповідність між віртуальною симуляцією та реальними умовами обробки. На рисунку 3.7 наведено приклад створення одного з таких різців, що застосовується для підрізання торця та виконання чистового проходу по зовнішньому контуру деталі.

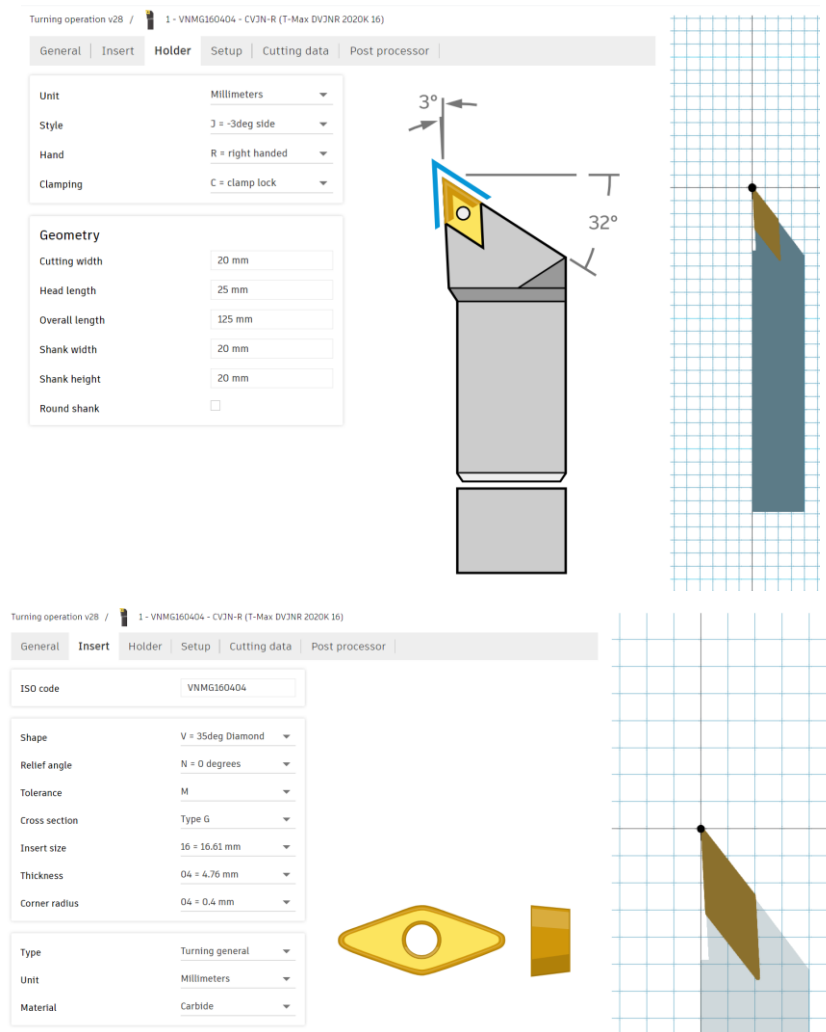


Рисунок 3.7 – Вікно задання параметрів тримача та пластини для спеціалізованого різця (Sandvik Coromant T-Max P DVJNR 2020K 16 з пластиною VNMG 16 04 04-MF 4425)

Для виконання переходів чорнового та чистового точіння зовнішнього контуру застосовуються відповідні команди у середовищі «Turning»: «Turning Profile Roughing» — для чорнкової обробки, та «Turning Profile Finishing» — для чистової.

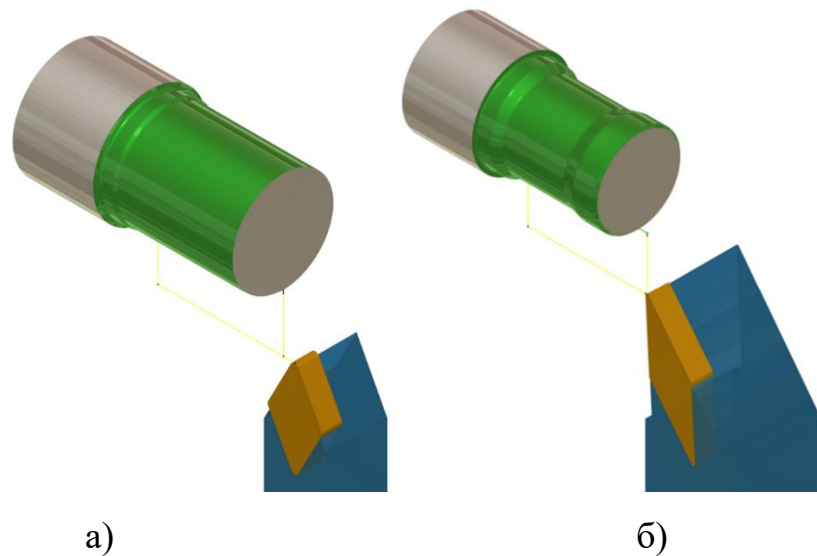


Рисунок 3.8 – Тривимірне зображення операції точіння зовнішнього контуру: а – чорновий прохід; б – чистовий прохід

Для виконання переходу точіння торцевої конусної канавки також використовується команда «Turning Profile Finishing». Однак у цьому випадку в полі «Turning Mode» необхідно обрати режим «Face Profiling», що дозволяє обробляти торцеву поверхню з профілем.



Рисунок 3.9 – Тривимірне зображення операції точіння торцевої канавки

Циклограми руху інструментів для кожного з переходів операції 010 наведено на рисунку 3.10.

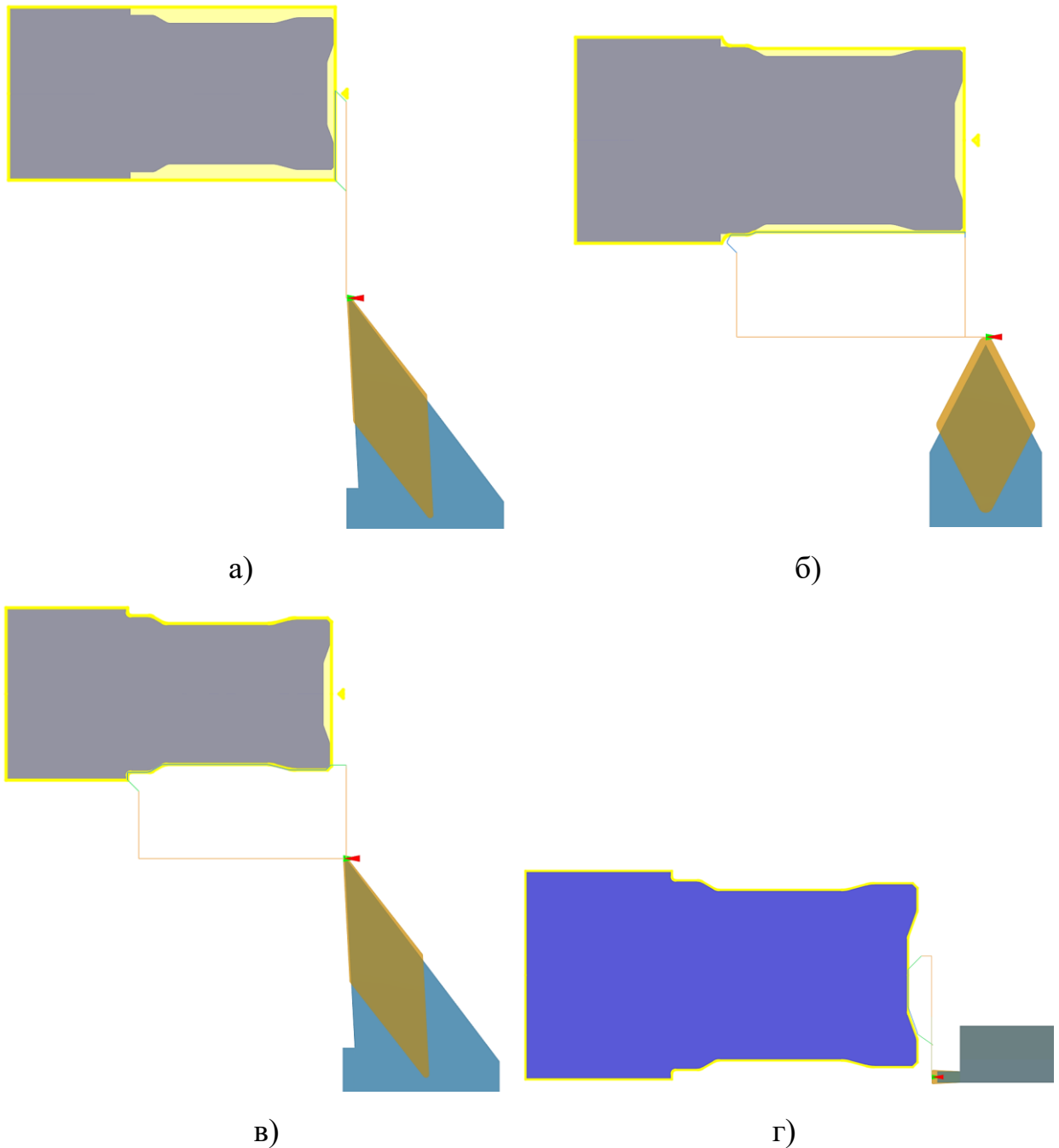


Рисунок 3.10 – Зображення циклограми руху інструментів на кожен перехід:
 а – точіння торця; б – чорнове точіння зовнішнього контуру; в - чистове точіння зовнішнього контуру; г – точіння торцевої конусної канавки

Після завершення побудови всіх переходів виконуємо симуляцію руху інструментів (рис. 3.11) із метою перевірки наявності можливих зарізів. За результатами перевірки дефекти не виявлено. Загальний час обробки, згідно з результатами симуляцією, склав 47 секунд.

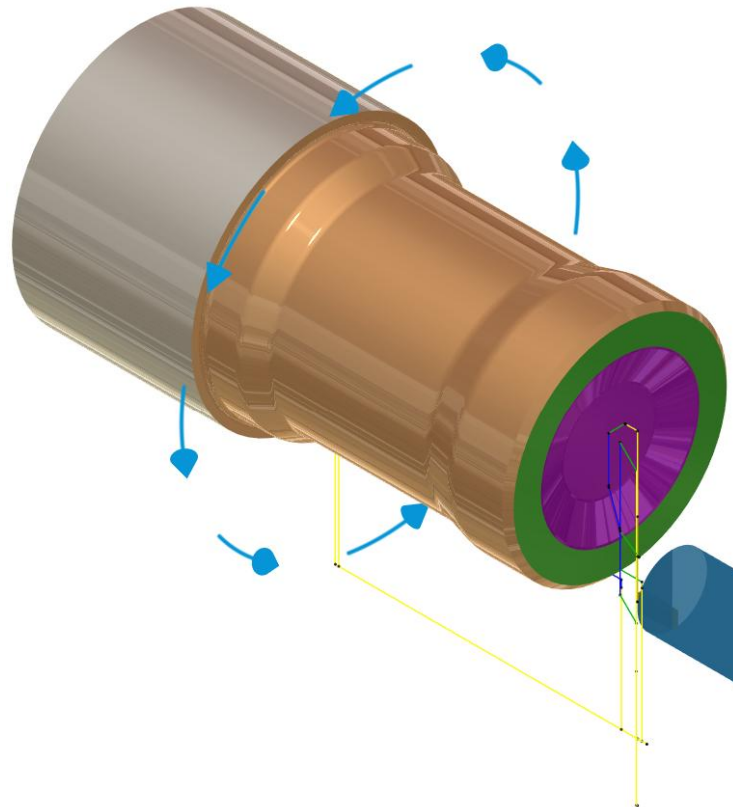


Рисунок 3.11 – Тривимірне зображення деталі після симуляції обробки

Тепер, коли все готово, можемо вивантажити керуючу програму натиснувши «Post Process». Програма згенерована у форматі G-коду відповідно до стандартів ISO, що забезпечує сумісність з широким спектром ЧПК-верстатів. Створена для операції 010 Токарна з ЧПК керуюча програма представлена у додатках.

Висновки за розділом

Проведено розробку технологічного процесу виготовлення складових частин кінцевої збірної фрези. Обґрунтовано вибір заготовок, послідовності

операцій та відповідного обладнання з урахуванням вимог до точності, шорсткості та матеріалу деталей.

Виконано розрахунок припусків на обробку для кожного етапу, що дозволяє забезпечити необхідну геометрію та якість поверхні. Розраховано режими різання з урахуванням властивостей матеріалу корпусу (сталь 40X) та умов фрезерування алюмінієвих сплавів.

Сформовано керуючу програму для обробки на верстаті з ЧПК, яка дозволяє досягти високої точності позиціонування та стабільної якості обробки. Запропоновані рішення забезпечують технологічність, повторюваність та надійність виготовлення фрези в умовах серійного виробництва.

4 ВЕРСТАТНІ ПРИСТОСУВАННЯ ДЛЯ ЗБІРКИ ТА ВИМІРЮВАНЬ

4.1 Контрольно-вимірювальні пристосування

У машинобудуванні важливим елементом процесу виготовлення виробів є засоби технологічного оснащення, зокрема технологічна оснастка (ТО) [41].

ТО — це пристрої й механізми, що доповнюють роботу технологічного обладнання та забезпечують виконання технологічних операцій. Вона сприяє підвищенню продуктивності, точності обробки та безпеки праці. До складу ТО входять різальні, вимірювальні інструменти та пристрої для базування, закріплення й контролю деталей на верстатах, пресах, вимірювальних установках тощо [41].

Основну частину технологічної оснастки становлять інструменти та пристосування, які забезпечують стабільність і точність виробничого процесу [41].

Пристосування є важливою складовою технологічного оснащення (ТО) та використовуються для встановлення або напрямлення заготовок і інструментів при виконанні технологічних операцій. Їх застосування дозволяє скоротити підготовчо-завершальний час, підвищити точність обробки й складання, а також сприяє автоматизації виробництва [41].

За призначенням пристосування поділяються на [41]:

- Верстатні — для закріплення заготовок на верстатах.
- Інструментальні — для точного встановлення інструменту.
- Складальні — для правильного з'єднання деталей.
- Контрольні — для перевірки точності обробки.
- Транспортно-кантувальні — для переміщення і перевертання заготовок.

Пристосування можуть мати різний ступінь спеціалізації залежно від їхнього призначення — зокрема для захоплення, переміщення або перевертання заготовок [41].

Конструктивно вони складаються з таких основних елементів [41].:

- Установні (опорні) — слугують для точного базування заготовок і деталей.
- Направляючі — забезпечують правильне розташування інструменту відносно заготовки.
- Настроювальні — використовуються для контролю положення інструменту під час налаштування обладнання;
- Базові — слугують основою для закріплення інших елементів та механізмів.
- Допоміжні — виконують додаткові функції, специфічні для окремих операцій.

Раціоналізація виробництва досягається за рахунок нормалізації та стандартизації елементів оснастки, що дозволяє зменшити номенклатуру, скоротити час проєктування та знизити витрати завдяки багаторазовому використанню готових рішень [41].

Для контролю точності обробки застосовують контрольно-вимірювальні пристосування (КВП), які складаються з базувальних, затискних та вимірювальних елементів. Вони повинні забезпечувати точність, продуктивність, зручність у роботі та економічну доцільність [1].

У межах проєкту передбачається створити пристосування для контролю торцевого биття кінцевої фрези. Основні вимоги — точне й надійне закріплення фрези, вимірювання торцевого і за можливості радіального биття, спрощена стандартизована конструкція.

4.2 Проектування складального оснащення

У ході розробки даного пристосування було вирішено питання щодо перевірки правильності виставлення пластин фрези кінцевої. Зокрема для цього було розроблено контрольнo-вимірювальне пристосування для контролю торцевого биття пластин фрези.

Загальний вигляд даного пристосування представлено на рис. 4.1. Його переріз по осі обертання фрези – на рис. 4.2. Також надана рознесена схема всієї збірки пристосування, яку представлено на рис. 4.3.

Розроблене контрольнo-вимірювальне оснащення в якості основи має плиту (поз. 5) з привареними рукоятками (поз. 10) необхідних для зручного переносу пристосування. До цієї плити на болти М10 (поз. 12) прикручено литий корпус (поз. 4). В середині цього корпусу встановлено вал несучий (поз. 6). Завдяки цьому валу, обертання від рукоятки обертальної (поз. 9) передається на цанговий патрон ER40 (поз. 3), а від нього вже на кінцеву фрезу (поз. 18). Цанговий патрон кріпиться на вал несучий завдяки гвинтам М20 (поз. 13). Рукоятка обертальна закріплена на валу завдяки установчому гвинту М6 (поз. 14).

Вал (поз. 6) обертається всередині корпусу (поз. 4) завдяки парним кульковим радіальним підшипникам (поз. 17). На валу підшипники фіксують по нижньому кільцю завдяки стопорному пружинному кільцю (поз. 15) та втулкою проставочною (поз. 7). А по верхньому кільцю - завдяки упиранню у виступ в кришці підшипника (поз. 8), причому між однією кришкою і підшипником нема технологічного зазору, а між іншою і підшипником він є. Це в першу необхідно для надійного затягування підшипників на валу, також це потрібно і для компенсації розширень від теплових деформацій. До того ж, ці підшипники в корпусі встановлені по схемі в розпір, що сприяє усуненню осьового люфту, забезпечуючи більш жорстке позиціонування вала в осьовому напрямку.

Для захисту від попадання бруду і пилу до порожнини між валом несучим і отвором під нього в корпусі, в кришках під підшипники передбачено місце для

встановлення манжет (поз. 16). Кришки (поз. 8) прикручуються до корпусу гвинтами (поз. 11).

На плиту, також встановлюється індикаторна магнітна стійка, з розміщеним на ній індикатором годинникового типу. Стійка виставляється по місцю і завдяки дії магнітного поля вона примагнічується до плити і є надійно закріпленою на ній.

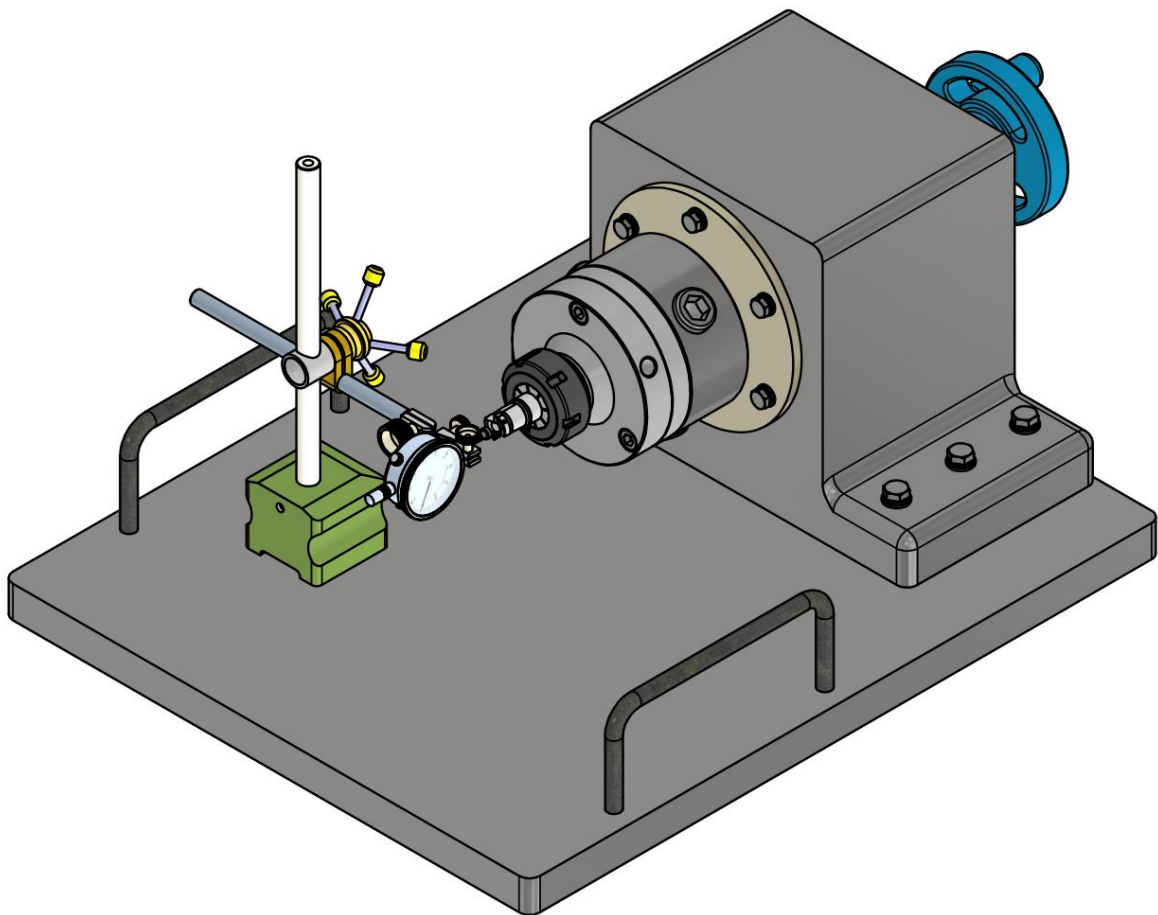


Рисунок 4.1 – Загальний вигляд контрольно-вимірального оснащення

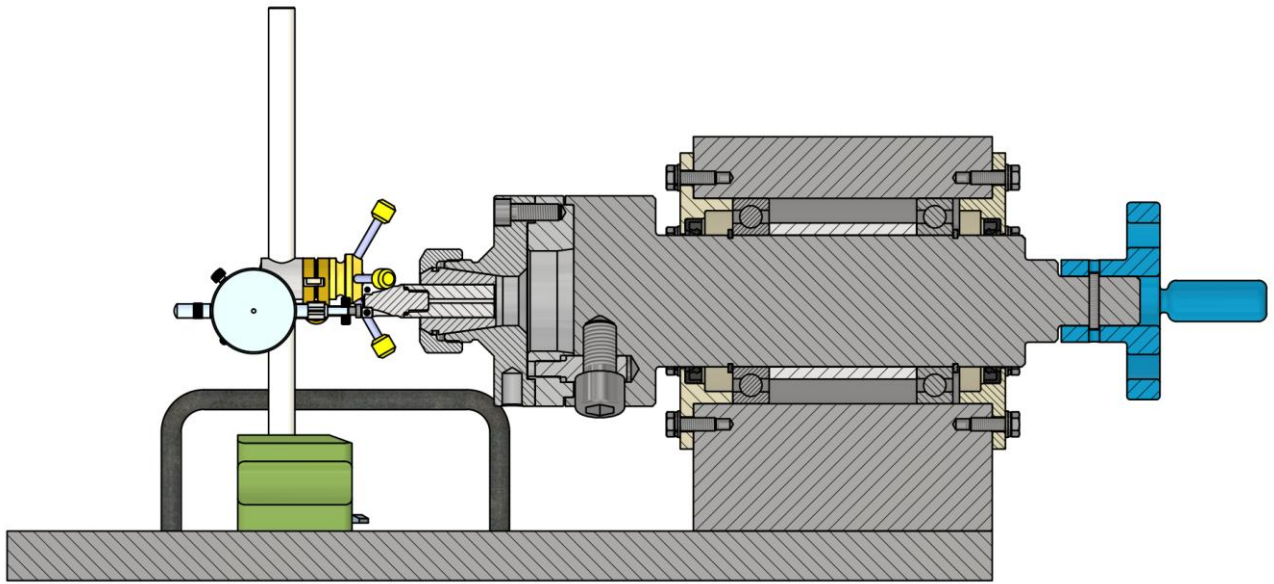


Рисунок 4.2 – Переріз пристосування по осі обертання фрези

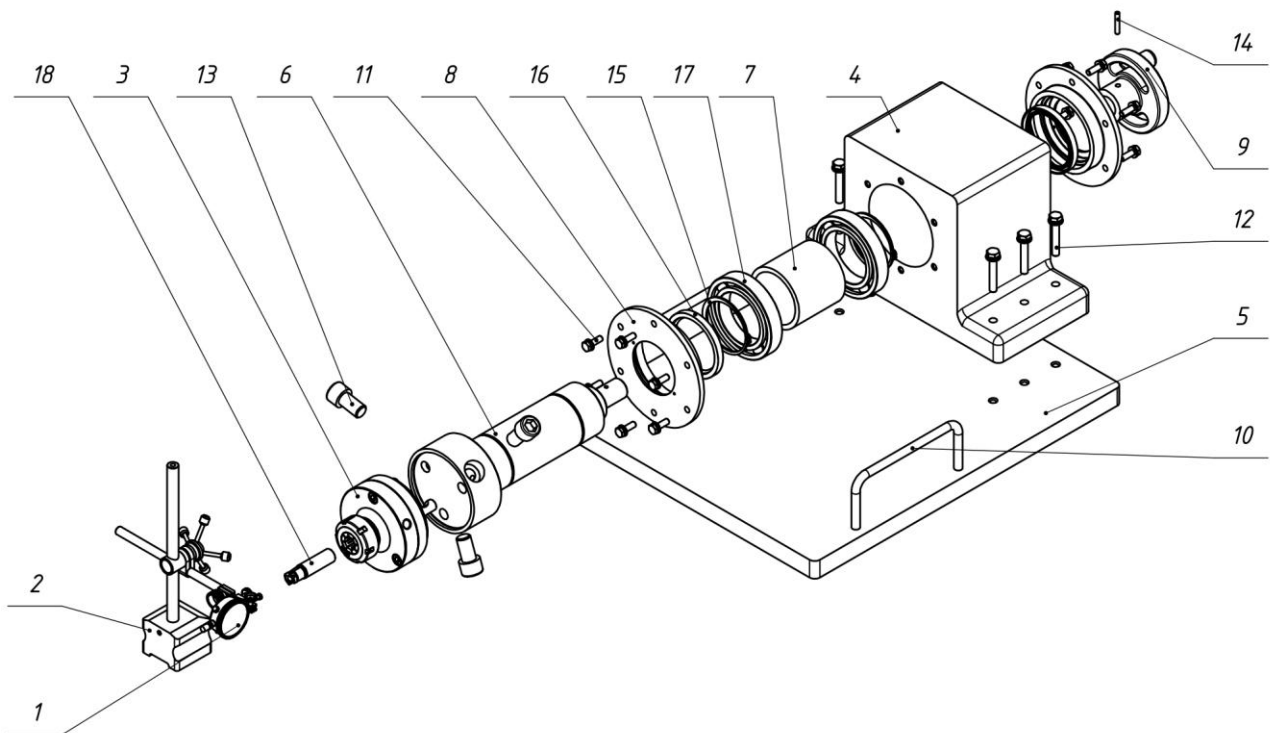


Рисунок 4.3 – Рознесена схема збірки пристосування

Принцип роботи цього пристосування такий, що при обертанні рукоятки (поз. 9), далі обертання передається на вал (поз. 6), від нього на цанговий патрон ER40 (поз. 3), який передає обертання вже на саму фрезу (поз. 18). Далі потрібно виставити індикатор зі стійкою в необхідне положення, щоб контролювати торцеве

биття вершин різальних пластини фрези. В процесі обертання фрези, перевіряється чи відхилення положення вершин пластин фрези знаходиться в межах заданого поля допуску. При необхідності, положення різальних пластин на фрезі регулюється, поки не буде отримано допустимих значень торцевого биття вершин пластин. Також, за необхідності, завдяки цьому пристосуванню, можна вимірювати і радіальне биття фрези, попередньо відкоригувавши положення індикаторної стійки з самим індикатором.

Однією з переваг даного пристосування є використання цангового патрону ER40 для кріплення кінцевої фрези. Оскільки цангові патрони такого типу використовуються в реальних горизонтально-фрезерних верстатах. Тобто за необхідності, цанговий патрон разом з фрезою можна використовувати як в даному контрольно-вимірювальному пристосуванні, так і горизонтально-фрезерному верстаті. Це в свою чергу, дозволить зменшити витрати на додатковий цанговий патрон, а ще дозволить зменшити час на наладку і установку фрези в шпindelь горизонтально-фрезерного верстату.

Іншою перевагою пристосування є можливість встановлення фрез інших діаметрів, попередньо змінивши розмір самої цанги. Це дозволить розширити можливості щодо контролю фрез інших розмірів

Висновки за розділом

У даному розділі розглянуто процес проєктування контрольно-вимірювального пристосування для збирання та контролю кінцевої фрези зі змінними пластинами. Розроблена конструкція дозволяє ефективно перевіряти торцеве та радіальне биття різальних елементів після складання інструмента.

До основних переваг пристосування належать:

- використання стандартного цангового патрона ER40, що дає змогу встановлювати фрезу безпосередньо як у пристосуванні, так і в горизонтально-фрезерному верстаті, зменшуючи витрати на переналадку;

- можливість контролю інструментів різного діаметра шляхом заміни цанги;
- надійне закріплення фрези та зручне налаштування індикаторної стійки для перевірки торцевого й радіального биття;
- проста, функціональна та уніфікована конструкція.

Застосування такого пристосування дозволяє підвищити точність встановлення пластин, покращити балансування інструмента, зменшити час налаштування та забезпечити якість обробки при подальшому використанні фрези у виробництві.

5 АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ

5.1 Розрахунок сили різання

У процесі складання збірних фрез особливу роль відіграють контрольні-вимірювальні пристосування, які забезпечують точне взаємне розташування компонентів інструмента, контроль відповідності геометричних параметрів та якість з'єднання деталей.

Вихідні дані:

- матеріал оброблюваної деталі: сталь 40Х;
- діаметр фрези: $D = 20$ мм;
- кількість різальних елементів: $Z = 2$;
- ширина фрезерування: $B = 5$ мм;
- подача на зуб: $Sz = 0,08$ мм/зуб;
- швидкість різання: $v = 800$ м/хв;
- частота обертання фрези: $n = 12732$ об/хв;
- глибина різання: $t = 1,5$ мм.

При фрезеруванні головною складовою сили різання є колова сила P_z [33], яка розраховується за формулою (5.44) [33]:

$$P_z = \frac{10 \cdot C \cdot t^x \cdot S^y \cdot B^u \cdot Z \cdot K_{mp}}{D^a \cdot n^{w_p}}$$

де $C_p = 160$ – коефіцієнт при різанні, згідно табл. Б.28 [33];

x, y, u, q, w – Показники степеня. Згідно табл.Б.28 [33]

вони дорівнюють: $x = 1$; $y = 0,9$; $u = 1$; $q = 0$,

$w = 0$ (спрощено);

$K_{mp} = 1,2$ – Поправочний коефіцієнт на якість оброблюваного матеріалу, згідно табл. Б.13 [33];

t – глибина різання, мм;

Sz – подача на зуб, мм/зуб;

- B – ширина фрезерування, мм;
 z – число зубців фрези;
 D – діаметр фрези, мм;
 n – розрахункова частота обертання шпинделя, об/хв.

Таблиця 5.1 – Технічні характеристики верстату з ЧПК VP-5 Haas

Параметри		Величини/розміри
Робоча поверхня столу		
Переміщення	по осі X	1016 мм
	по осі Y	660 мм
	по осі Z	635 мм
Відстань від поверхні столу до торцю шпинделя		178 – 813 мм
Конус шпинделя		СТ/ВТ-40
Частота обертання шпинделя		до 8 100 об/хв
Потужність двигуна шпинделя	миттєва потужність	22,4 кВт
	постійна робота	15 кВт
Максимальний крутний момент на шпинделі (не більше 15 хв)		203 Н·м
Робоча подача при різанні по осям X, Y, Z		до 12.7 м/хв

Отже, за формулою (5.1) розраховуємо колову силу різання:

$$P_z = \frac{10 \cdot C \cdot t^x \cdot S^y \cdot B^u \cdot z \cdot K_{mp}}{D^a \cdot n^{w_p}}$$

$$P_z = \frac{10 \cdot 160 \cdot 1,5^1 \cdot 0,08^{0,9} \cdot 5^1 \cdot 2 \cdot 1,2}{20^0 \cdot 12732^0} = 2468,1 \text{ Н}$$

Радіальна складова сили різання P_y визначається за співвідношенням згідно [33], залежно від колової сили P_z . Для умов обробки алюмінію з фрезою WC-Co типова частка становить :

$$P_y = (0,4 \div 0,6) \cdot P_z$$

$$P_y = (0,4 \div 0,6) \cdot 2966,01 = 987,2 \div 1480,9 \text{ Н}$$

Приймаємо $P_y = 1200$ Н.

Для перевірки ефективності використання потужності верстата використовується формула (5.54) [33]:

$$N_e = \frac{P_z \cdot v}{1020 \cdot 60}$$

$$N_e = \frac{2468,1 \cdot 800}{1020 \cdot 60} = 32,26 \text{ кВт}$$

Потрібна потужність на шпинделі визначається за формулою (5.46) [33]:

$$N_{\Pi} = \frac{N_e}{\eta_B}$$

де: $N_e = 32,26$ кВт— ефективна потужність різання,
 $\eta_B = 0,85$ — ККД приводу головного руху верстата.

$$N_{\Pi} = \frac{32,26}{0,85} = 37,95 \text{ кВт}$$

Тепер, за формулою (5.47) [33] розрахуємо коефіцієнт використання верстату за його потужністю:

$$K = \frac{N_{\Pi}}{N'_B}$$

І з урахуванням підставлених значень:

$$N_{\Pi} = 37,95 \text{ кВт}$$

$$N'_B = 22 \text{ кВт}$$

$$K = \frac{N_{\Pi}}{N'_B} = \frac{37,95}{22} = 1,73$$

Таким чином це означає, що коефіцієнт використання потужності перевищує 1, тобто верстат перевантажено.

5.2 Розрахунок напружено-деформованого стану

Даний розрахунок проводиться з метою визначення діючих сил і напружень, що виникають в процесі роботи даної фрези, а також для перевірки фрези на міцність під час роботи.

Аналіз напружено деформованого стану фрези проводимо в програмі ANSYS Workbench. Для початку задаємо геометрію та механічні характеристики матеріалу з якого виготовлена фреза.



Рисунок 5.1 - Загальний вигляд фрези

Properties of Outline Row 3: Structural Steel			
A	B	C	D E
Property	Value	Unit	
1	Material Field Variables	Table	
3	Density	7850	kg m ⁻³
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
5	Coefficient of Thermal Expansion	1.2E-05	C ⁻¹
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Modulus and Po...	
8	Young's Modulus	2E+11	Pa
9	Poisson's Ratio	0.3	
10	Bulk Modulus	1.6667E+11	Pa
11	Shear Modulus	7.6923E+10	Pa
12	Strain-Life Parameters		
20	S-N Curve	Tabular	
24	Tensile Yield Strength	2.5E+08	Pa
25	Compressive Yield Strength	2.5E+08	Pa
26	Tensile Ultimate Strength	4.6E+08	Pa
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa

Рисунок 5.2 - Механічні характеристики сталі 40X

Наступним етапом задаємо граничні умови, які відповідають процесу її роботи. В даному випадку це сила різання. Силу різання прикладають до головної та проміжної різальних кромek, також до перехідного радіусу між ними. В даному випадку прикладаємо колову силу $P_z = 213 \text{ Н}$ та радіальну силу $P_y = 74 \text{ Н}$, що були розраховані раніше

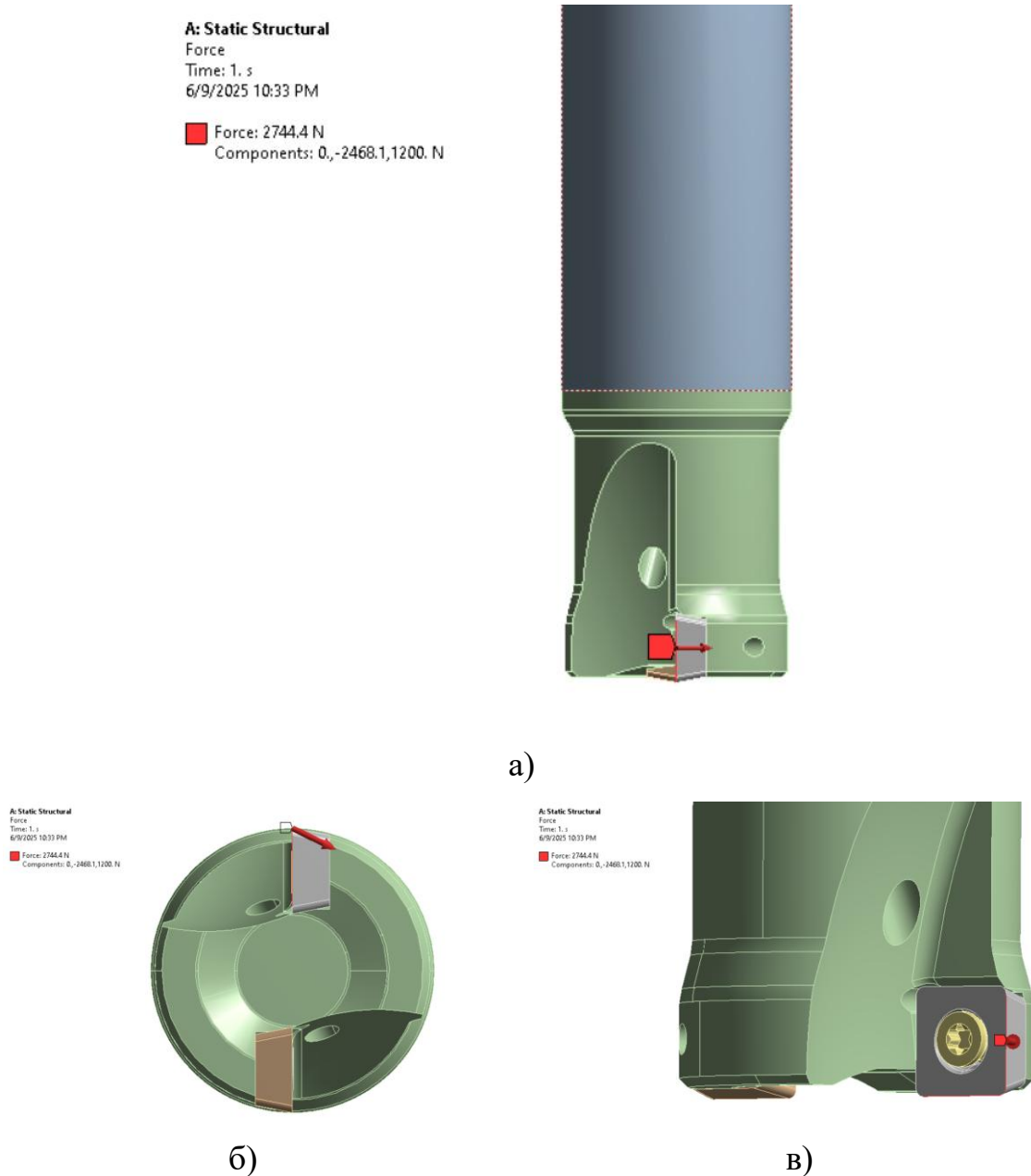


Рисунок 5.3 - Прикладена сила різання до пластини: а – вид спереду, б – вид знизу, в – місце прикладання сили

Останнім етапом будемо створимо скінченно елементну сітку для аналізу напружено – деформованого стану. Параметри для сітки: розмір елемента – 1мм, тип елемента – hexahedron.

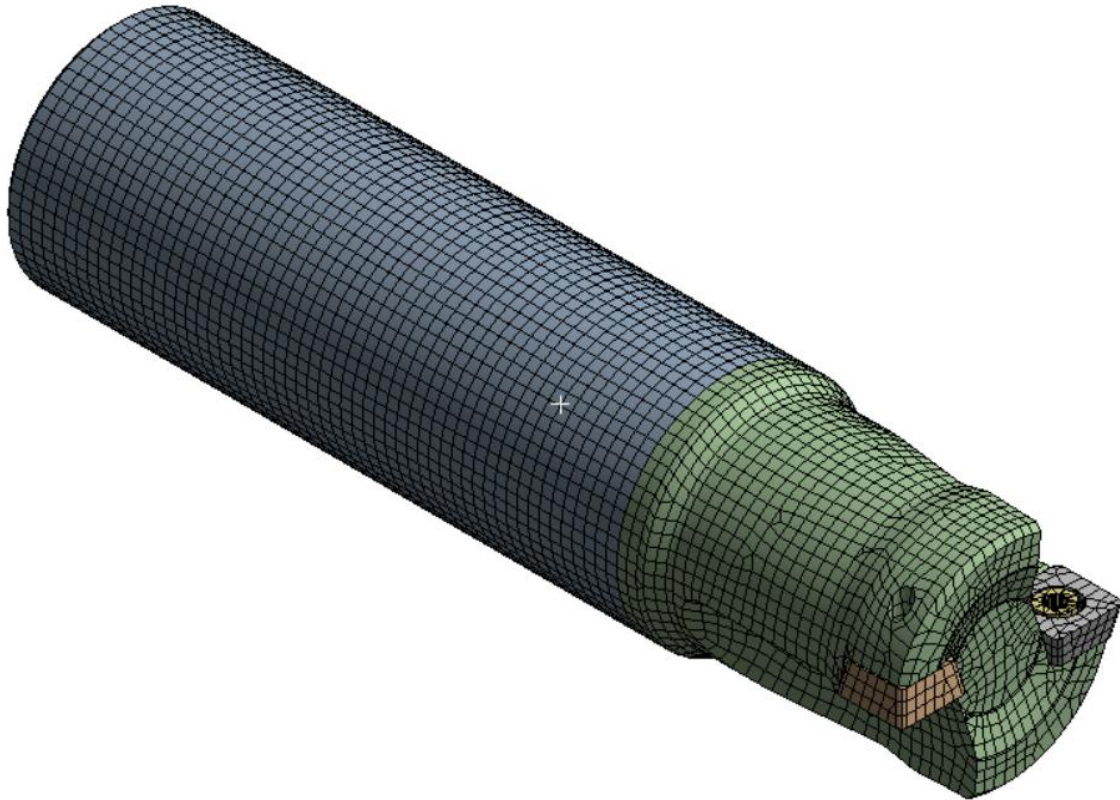


Рисунок 5.4 - Побудована скінченно елемента сітка на фрезі

Після цього моделюємо процес аналізу напружено-деформованого стану фрези під час роботи. В результаті отримаємо:

- 1) Коефіцієнт запасу міцності (safety factor)
- 2) Максимальне основне напруження (maximum principal stress)
- 3) Переміщення (deformation)

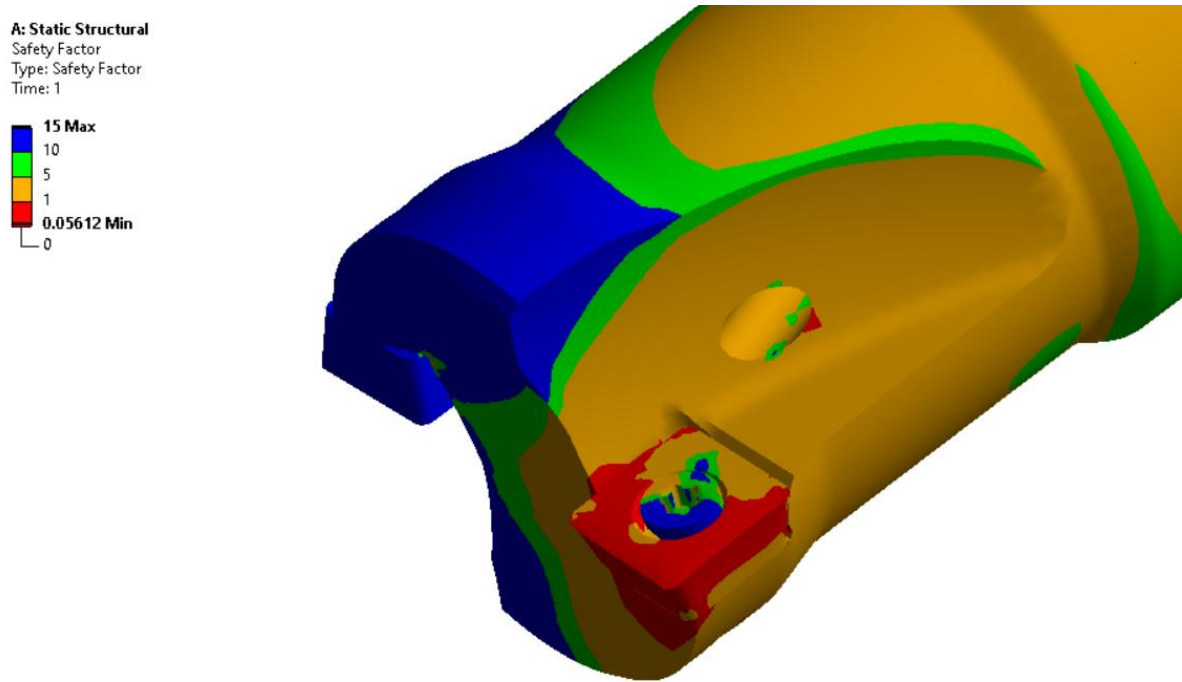


Рисунок 5.5 - Коэффициент запаса прочности

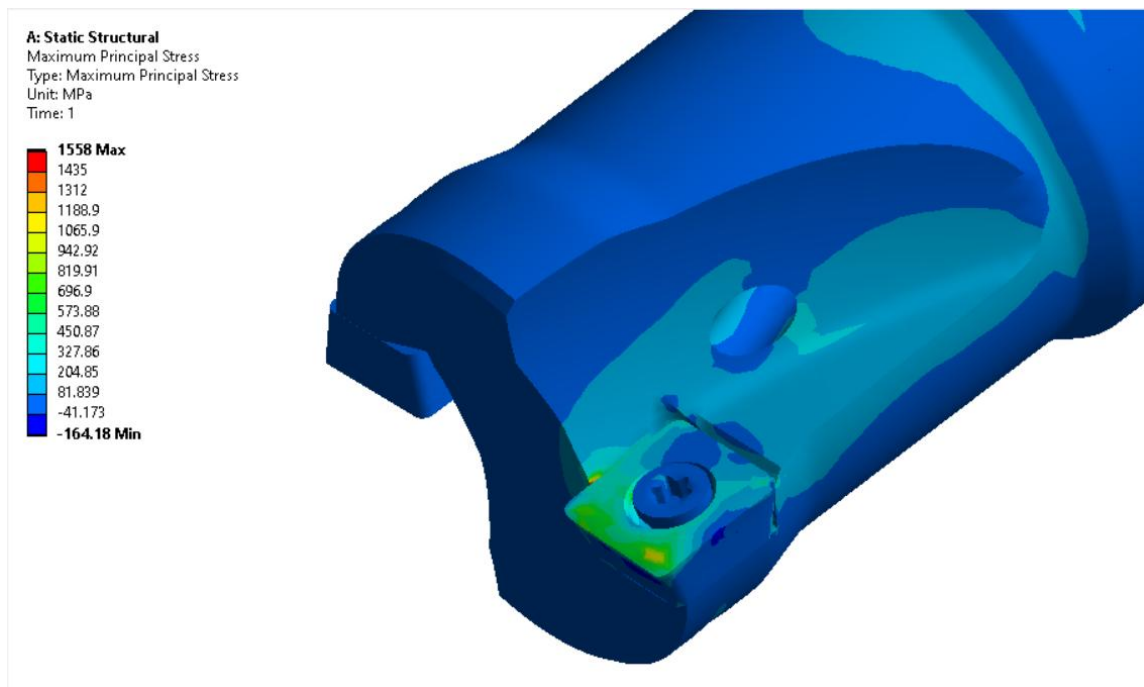


Рисунок 5.6 - Максимальне основне напруження

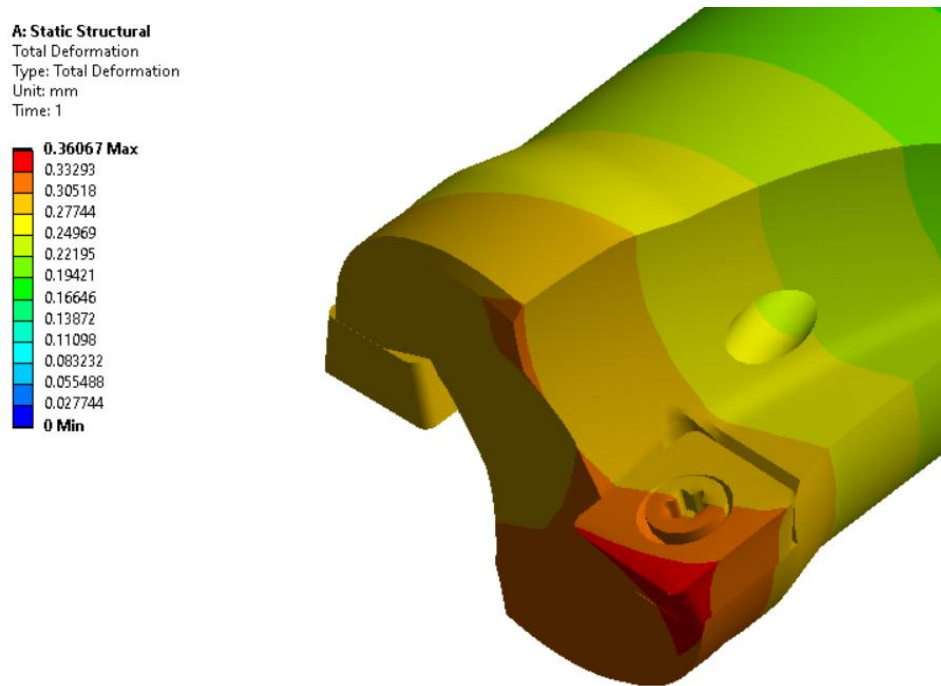


Рисунок 5.7 - Переміщення

Проведемо аналіз отриманих результатів. Згідно результатів коефіцієнту запасу міності, мінімальне значення складає 1.9, що більше за мінімальний 1.5. Таким чином фреза та її складові елементи витримують сили що виникають під час її роботи.

На рис. 5.6 видно, що найбільші напруження виникають на різальній кромці пластини. Найбільше значення максимального основного напруження складає 579 МПа.

На рис. 5.7 видно що максимальні переміщення виникають в зоні різальної кромки пластини. Його значення – 0,36мм. Тобто воно дуже мале і знаходиться в межах допуску.

Отже, отримані результати аналізу напружено-деформованого стану свідчать про те, що в процесі роботи фреза витримає навантаження, що виникатимуть при високошвидкісному фрезеруванні загартованої сталі. Це пов'язано з правильно підібраними матеріалами, режимами різання та конструкцією фрези.

ВИСНОВКИ

У межах дипломного проєкту було розроблено конструкцію збірної кінцевої фрези, призначеної для високошвидкісної обробки алюмінієвих сплавів, що широко використовуються в авіаційній та машинобудівній промисловості.

На основі аналізу літературних джерел, патентної документації та інструментальних каталогів сформовано вимоги до конструкції інструмента з урахуванням особливостей оброблюваного матеріалу. Розроблена фреза має збірну конструкцію з модульною головкою та змінними твердосплавними пластинами, що забезпечує її економічність, зручність обслуговування та адаптивність до різних умов обробки.

Проведено 3D-моделювання фрези в CAD-середовищі, спроектовано технологічний процес виготовлення корпусу та головки, розраховано припуски та режими різання, створено керуючу програму для ЧПК-обладнання. Розроблено контрольно-вимірювальне пристосування для перевірки торцевого та радіального биття фрези, що забезпечує точність при її збиранні.

За результатами моделювання напружено-деформованого стану підтверджено міцність і жорсткість конструкції, що дозволяє експлуатацію інструмента в умовах HSM без ризику пошкодження.

Отримані результати свідчать про відповідність розробленої конструкції вимогам до сучасного фрезерного інструменту для обробки алюмінію в умовах серійного виробництва. Запропоновані технічні рішення дозволяють знизити витрати, підвищити якість обробки та забезпечити надійну експлуатацію інструмента при високих навантаженнях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. CoroMill® Plura solid carbide end mill for high-feed side milling —
<https://www.sandvik.coromant.com/en-us/tools/milling-tools/solid-carbide-end-mills/coromill-plura/solid-carbide-end-mill-for-high-feed-side-milling>
2. Sandvik Coromant – CoroMill 316 End Mills [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.sandvik.coromant.com> (дата звернення 20.05.2025)
3. Walter Tools – M4575 Milling Cutter, M4000 Series. [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.walter-tools.com> (дата звернення: 18.05.2025).
4. ISCAR MULTI-MASTER – Modular End Milling System [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.iscar.com> (дата звернення: 15.05.2025).
5. Mike Macarthur. End mill with mirror-polished cutting edge. U.S. Patent US 6655880 B2, опубліковано 02.12.2003. [Електронний ресурс]. – URL: <https://patents.google.com/patent/US6655880B2> (дата звернення 17.05.2025)
6. Patent US20060067797A1. End mill with variable margin. – USPTO, 2006. [Електронний ресурс].
URL: <https://patents.google.com/patent/US6655880B2/en>
7. Kennametal Inc. Coupling mechanism for cutting tool. U.S. Patent US 9643262 B2, опубліковано 9.05.2017. [Електронний ресурс]. – URL: <https://patents.google.com/patent/US9643262B2> (дата звернення 17.05.2025)
8. Kennametal Inc. Modular rotary cutting tool system. U.S. Patent US 9643264 B2, опубліковано 16.05.2017. [Електронний ресурс]. – URL: <https://patents.google.com/patent/US9643264B2> (дата звернення 18.05.2025)
9. Властивості алюмінію [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.metric-bolt-torque.com/materials/aluminum-properties> (дата звернення 18.05.2025)
10. Погребняк, А.Д. Фізико-хімічні основи модифікування поверхні матеріалів: монографія. – Суми: СумДУ, 2021. – 387 с.
11. Виговський, В.І. Проблеми обробки легких сплавів. – Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки. – 2010. – №1(51). – С. 45–50.

12. Виговський, В.І., Сидорчук, С.М. Сучасні тенденції у виборі інструментальних матеріалів. – Вісник машинобудування та транспорту. – 2007. – №2. – С. 33–37.
13. Мельничук, М.П. Основи теорії різання: Підручник. – К.: НАУ, 2002. – 358 с.
14. Каталог твердосплавних пластин ZCC-CT / APGT1605PDER-G2 K20. – [Електронний ресурс]. – URL: <https://zccct.com.ua> (дата звернення 18.05.2025)
15. Tungaloy. PCD/CBN Tools for Non-ferrous Machining. – [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.tungaloy.com> (дата звернення 19.05.2025)
16. Погребняк, А.Д., Борщевський, А.В. Покриття типу AlCrN і TiAlN у металообробці. – Поверхня. – 2021. – Вип. 13. – С. 25–31.
17. Balázs, K. DLC coatings in machining aluminium alloys. – Materials Science Forum, 2017. – Vol. 885. – P. 122–127
18. Виговський В. І. Вибір конструктивних геометричних параметрів ріжучих інструментів / Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки. – 2010. – №1(51). – С. 38–43.
19. Кузьмічов В. Є. Механіка різання матеріалів і основи різального інструменту: навч. посібник. – Харків: НТУ "ХПІ", 2016. – 252 с.
20. Сидорчук С. М. Розрахунок і конструювання інструментів для токарної обробки. – Тернопіль: ТНТУ, 2013. – 146 с.
21. Каталог ріжучого інструменту ZCC-CT. Серія пластин DCGT/VCGT/RCGT для кольорових металів. – [Електронний ресурс]. – URL: <https://zccct.com.ua> (дата звернення 19.05.2025)
22. Ткаченко І. І. Вплив геометрії різальної частини інструмента на формування стружки під час обробки алюмінієвих сплавів / Вісник машинобудування та транспорту. – 2019. – №3. – С. 28–32.
23. Науково-технічний збірник «Інструмент» / Хмельницький нац. ун-т. – 2020. – №25. – Стаття: Вибір раціональних параметрів стружколамів при обробці алюмінієвих сплавів.

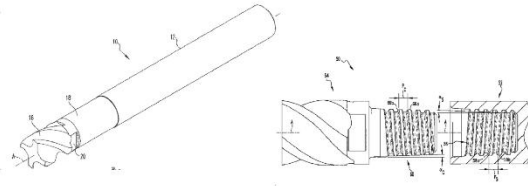
24. Sandvik Coromant. Пластина 490R-08T308M-KL 3330. – Офіційний сайт. – [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/product-details?c=490R-08T308M-KL%20%20%20%20%203330>
25. Sandvik Coromant. Пластина 490R-08T308E-ML H13A [Електронний ресурс] // Офіційний сайт Sandvik Coromant. – URL: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/product-details?c=490R-08T308E-MLH13A>
26. Mitsubishi Materials Corporation. Wiper Insert – Technical Information. [Електронний ресурс]. – Офіційний сайт Mitsubishi Materials. - URL: https://www.mmccarbide.com/us/technical_information/tec_turning_tools/tec_turning_insert/guide/tec_turning_wiper
27. Sandvik Coromant. CoroMill 316 [Електронний ресурс] // Офіційний сайт Sandvik Coromant. – URL: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/product-details?c=316-10SM450-10030P%20%201030&m=5758419>
28. ZCC-CT. Solid carbide milling AL series [Електронний ресурс]. – URL: https://tooler.com/attachments/itemgroups/ZCC_AL_series_AL-2E.pdf
29. Guhring. RF 100 Speed – твердосплавна фреза з мультизубною геометрією [Електронний ресурс] // Офіційний сайт Guhring. – URL: <https://www.guhring.com/ProductsServices/ViewProductLine/RF-100-Speed>
30. Guhring GmbH. Фреза RF 100 A (серія 3077) – кінцева твердосплавна фреза для високошвидкісної обробки [Електронний ресурс]. – URL: <https://guhring.com/ProductsServices/SeriesDetails?Series=3077&fromResults=True>
31. Повар, Я. І. Сталь 40Х в машинобудуванні: властивості та застосування // Вісник СумДУ, 2020. – № 3. – С. 45–53.
32. Павленко С. В. Різання та інструмент у технологічних системах [Електронний ресурс]. – Харків: ХПІ, 2011. – 112 с.
33. Проектування та технологічне забезпечення інструментальних систем інженерного дизайну [Електронний ресурс] : Навчальний посібник для

- студентів технічних спеціальностей / В. І. Солодкий, Ю. І. Адаменко, В. В. Вовк, Н. В. Мініцька : КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 9,6 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 225 с.
34. Допуски, посадки та технічні вимірювання. Практикум. Частина 1 [Текст]: навч. посібн. / Ю.І. Адаменко, О.М. Герасимчук, С.В. Майданюк, Н.В. Мініцька, В.А. Пасічник, О.А. Плівак. – Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2016. – 164 с.
35. Підбір і розрахунок режимів різання при обробці заготовки на металорізальних верстатах : методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни "Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів". Розділ "Обробка різанням" [Електронний ресурс] / укладачі : Е. С. Геворкян, В. П. Нерубацький ; кафедра "Матеріали і технологія виготовлення виробів транспортного призначення". - Харків : УкрДАЗТ, 2012. - 103 с. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/6068> (дата звернення 10.06.2025).
36. Виговський Г. М. Особливості конструювання фрез для високошвидкісної обробки / Георгій Миколайович Виговський // Вісник ЖДТУ. – 2012. – Т. 1, № 4 (63). – С. 12–21.
37. Паспорт і керівництво з експлуатації токарного верстата з ЧПК MAST ML 500×1000 SH8. — ТОВ «MAST CNC Equipment». — Київ, 2021. — 56 с.
38. ДСТУ 4543:2006. Сталь конструкційна. Загальні технічні умови. — К.: Держспоживстандарт України, 2007. — 28 с.
39. Ковальов В. С. Різальний інструмент: Підручник. — К.: Арістей, 2011. — 368 с.
40. Системи інструментального забезпечення: Метод. вказівки до практичної роботи «Розрахунок зміщення осі гвинта для кріплення 87 різальної пластини» / Уклад.: Ю.І. Адаменко – К.: НТУУ «КПІ», 2018. – 19 с;
41. Петров, О. В. Технологічна оснастка : навчальний посібник / О. В. Петров, С. І. Сухоруков. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 123 с.

ДОДАТОК А

СИНТЕЗ КОНСТРУКЦІЇ КІНЦЕВОЇ ФРЕЗИ

Аналіз та синтез конструкції кінцевих фрез



Патент US9643264B2. З'єднувальний механізм для ріжучого інструмента

Тип підведення охолодження:
осьове, концентричне підведення



Sandvik CoroMill
MS20-R020B20-10L

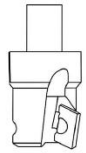
- + захист від прокручування
- менша точність центрування
- не для високих швидкостей



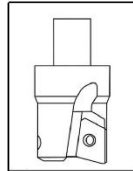
Sandvik CoroMill
490-020A20-08L

- + просто та дешево
- + універсально
- може прокручуватись

Модульна головка



Прихватом



Гвинтом у
центральному
отворі



Касетно-гвинтовий
спосіб

Тип кріплення пластин



Sandvik CoroMill
MS20-R025EH25-10L



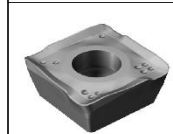
Sandvik CoroMill
MS20-R025EH25-10M



Sandvik CoroMill
MS20-R025EH25-10H

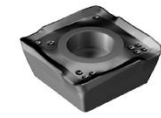
Кількість зубців

- + висока зносостійкість
- + висока якість обробки
- більш жорсткий різ
- вібрації на тонких деталях



Sandvik CoroMill
490R-08T308E-ML H13A

- + менше вібрацій
- + м'яке різання
- менша зносостійкість
- обробка чавуну



Sandvik CoroMill
490R-08T308M-KL 3330

Різальні пластини

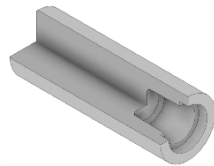
Виконала: ст. гр. МІ-12, Ляшук В. Р.
Перевірила: ст. викл., к.т.н., Парненко В. С.

ДОДАТОК Б

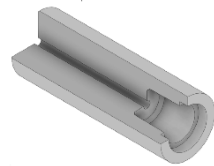
ПОБУДОВА 3D-МОДЕЛІ ФРЕЗИ

Етапи створення 3D-моделі фрези кінцевої

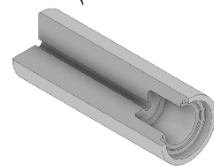
№1. Побудова хвостовика фрези



Операції: Обертання, фаска
Базова форма корпусу з отвором

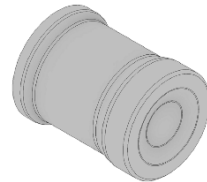


Операції: Різьба, отвір
Додаємо конусну різьду,
створюємо наскрізний отвір

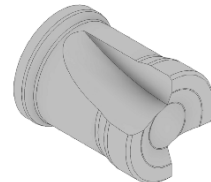


Операції: Обертання, радіус
Створюємо канавку під
ущільнювальне кільце

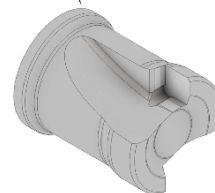
№2. Побудова головки фрези



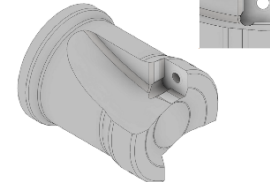
Операції: Обертання, фаска, радіус
Побудова зовнішнього контуру



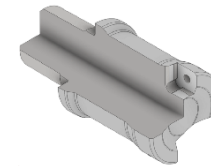
Операції: Здвиг, круговий масив
Виконуємо стружкову канавку.
Симетрія через масив



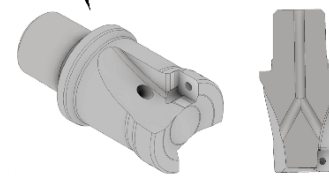
Операції: Вирізання, видавлювання,
масив, фаска, радіус
Видавлюємо пази під пластини



Операції: Отвір
Додаємо різьбовий отвір
на дні пазу

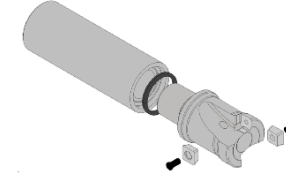


Операції: Видавлювання, обертання, різьба,
заокруглення, фаска
Формуємо з'єднувальну частину: циліндр,
конус, конусна різьба



Операції: Видавлювання, радіус
Виконуємо отвір під охолодження

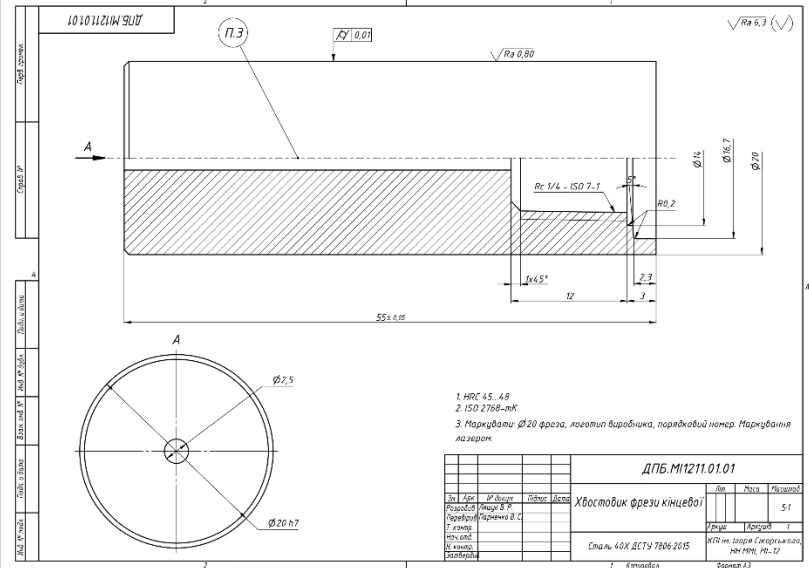
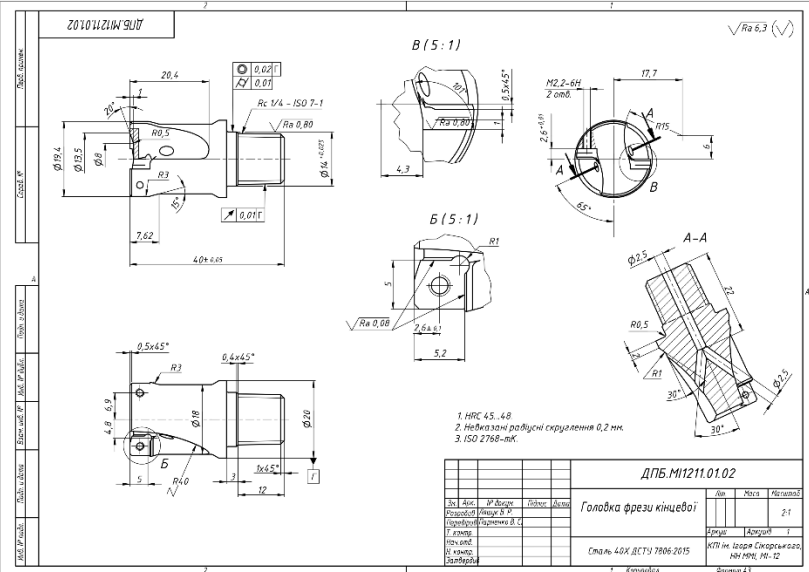
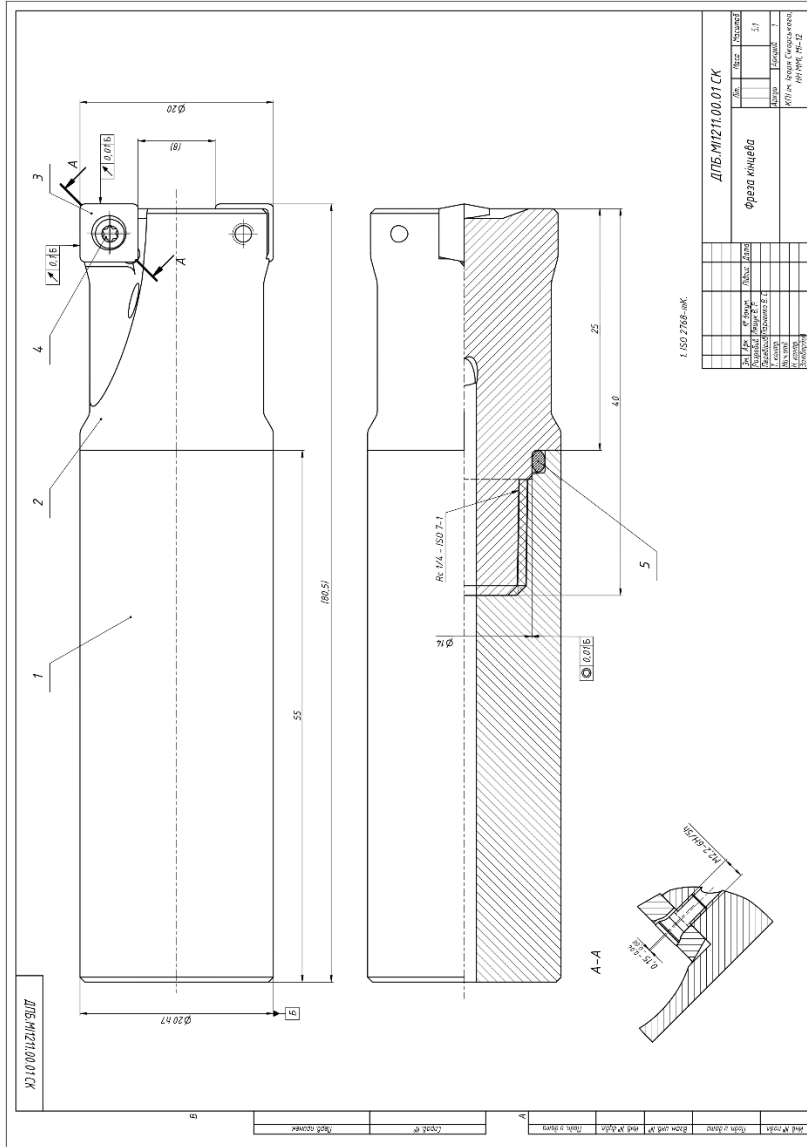
№3. Складання фрези



Операції: Складальна
Виконуємо збірку фрези

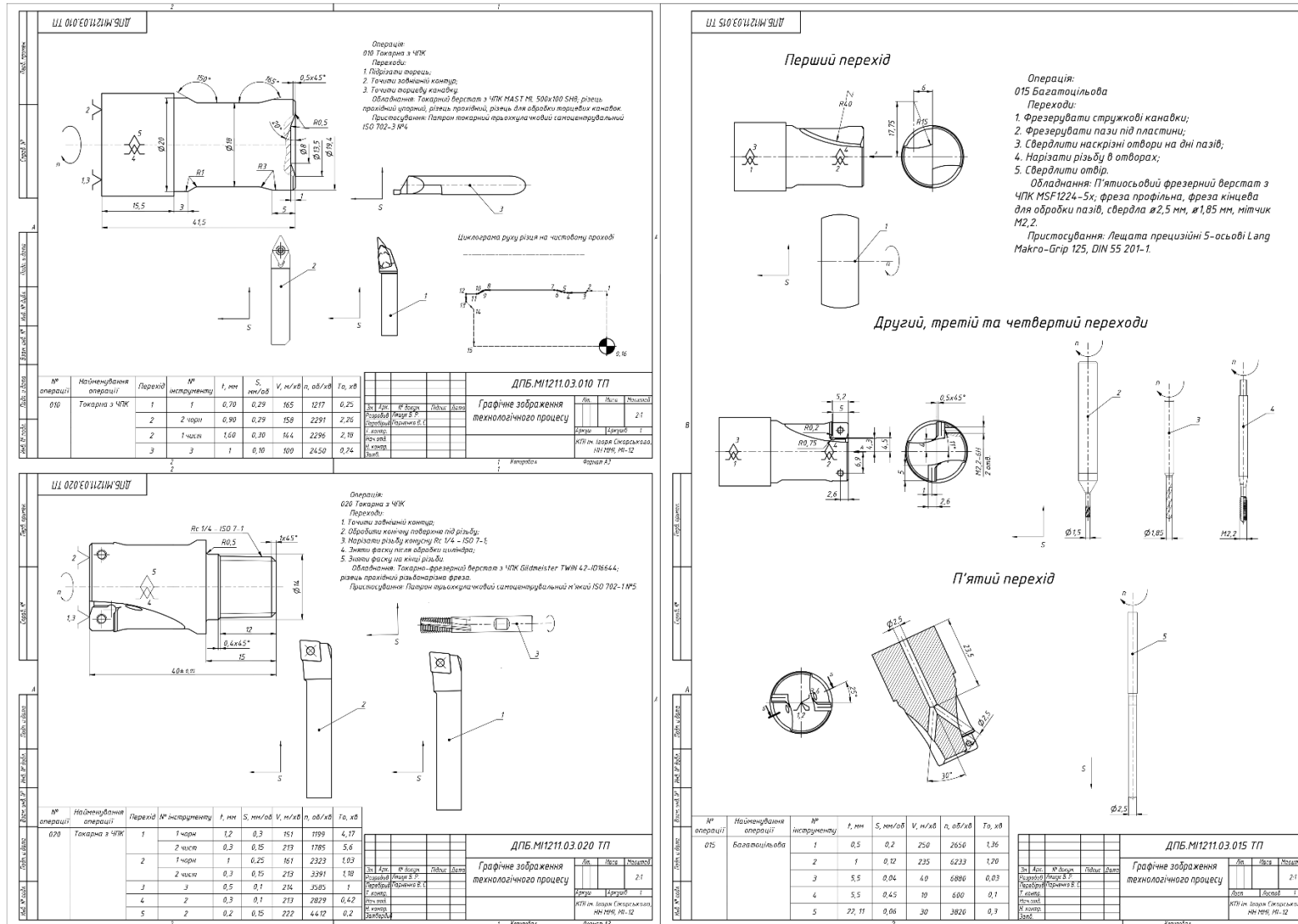
Виконала: ст. гр. МІ-12, Ляшук В. Р.
Перевірила: ст. викл., к.т.н., Парненко В. С.

ДОДАТОК В СКЛАДАЛЬНІ ТА РОБОЧІ КРЕСЛЕНИКИ ФРЕЗИ



ДОДАТОК Г

ГРАФІЧНЕ ЗОБРАЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТОКАРНОЇ ТА БАГАТОЦІЛЬОВОЇ ОПЕРАЦІЙ



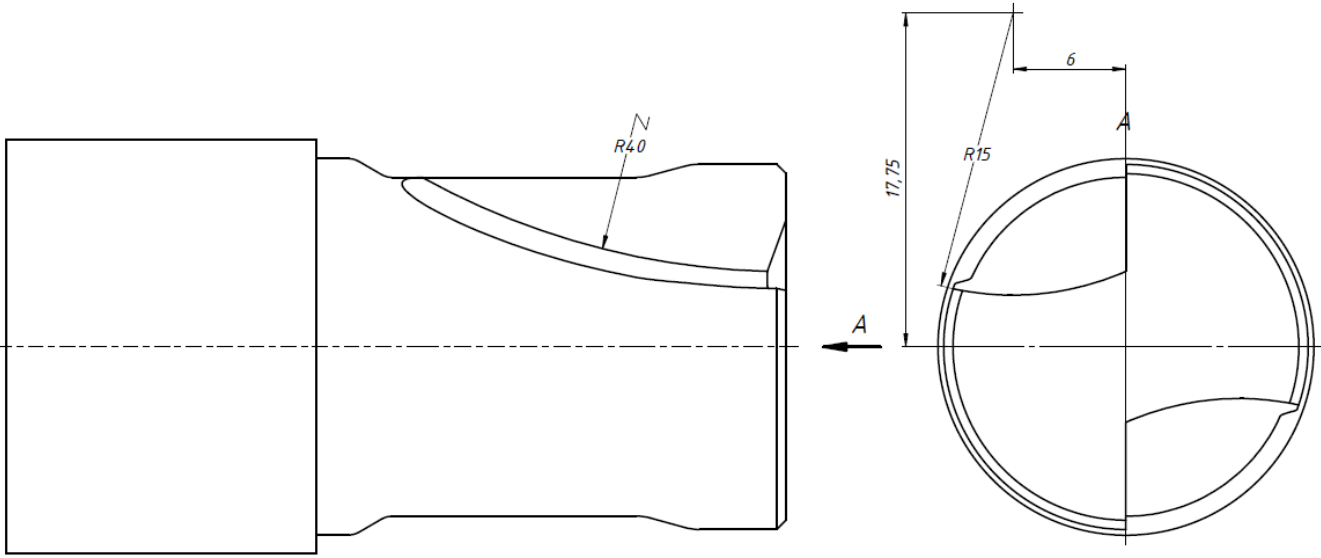
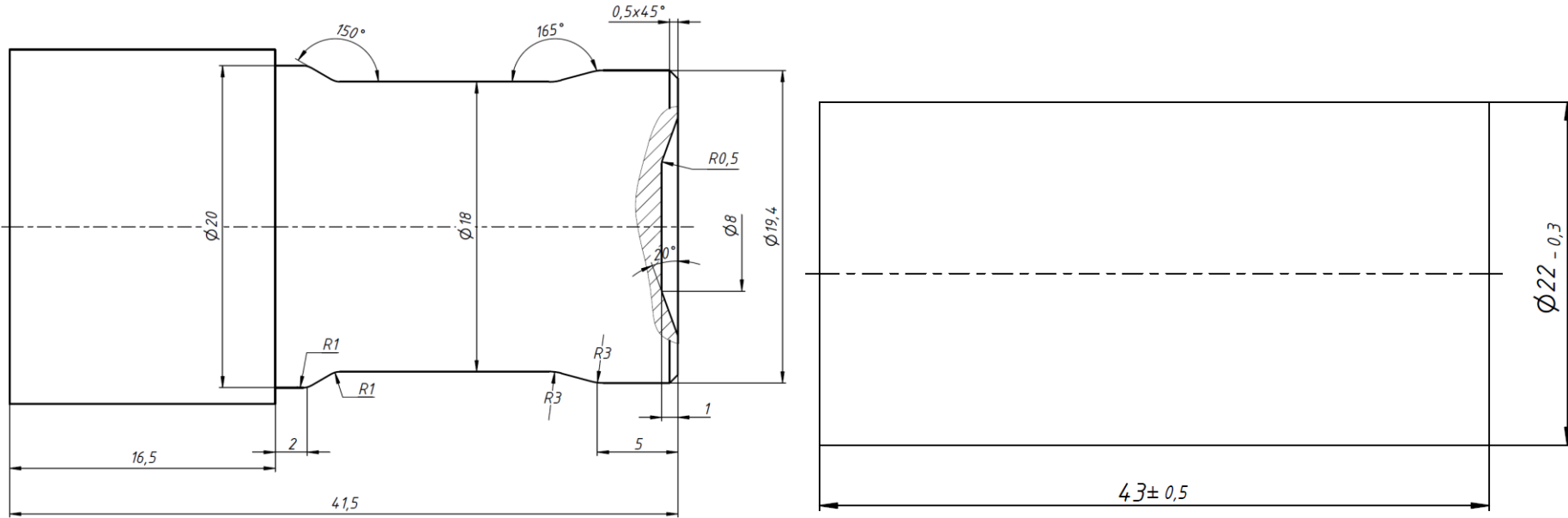
Таблиця Г.1 – Маршрутна карта виготовлення головки фрези конічної

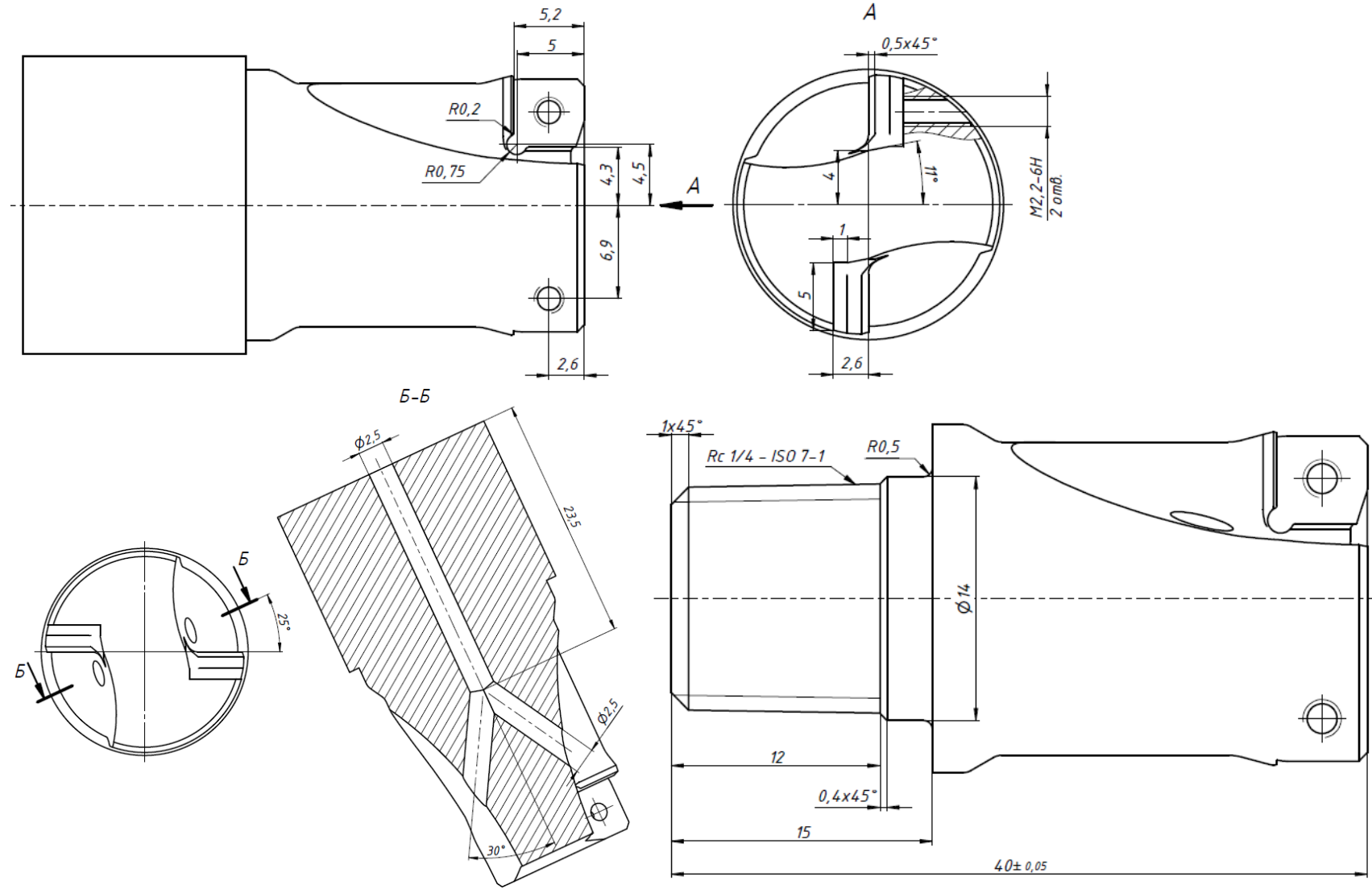
Дубл.																			
Взам.																			
Підп.																			
										MI-12									
Розроб.	Ляшук						“КПІ ім. Ігоря Сікорського”, кафедра КМ												
Перевір.	Парненко																		
Утв.																			
Н.контр.													ДП		3		1		
М 01	Сталь 40X ДСТУ 7806:2015																		
М 02	Код		ОВ	МД	ОН	Н.вигр.	КВМ	Код заготовки		Профіль та розміри			КД	МЗ					
	1111		кг	6,4	1	4,3	0,54	03		Ø22 x 43			1	11,4					
А	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Код, назва операції			Позначення документу											
Б	Код, назва обладнання						СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОВД	ЕН	ОП	Кшт	Тпз	Тшт		
А 05	005 Заготівельна																		
Б 06	Відрізний верстат ЕОС-355-2650						2	16925	313	Р	1	1	1	110	10	8	0,6		
О 07	Відрізати заготовку діаметром Ø22 мм і довжиною $L = 43$ мм.																		
Т 08	Лещата. Стрічкова відрізна пилка 13×0.65 мм, 10/14 ТРІ.																		
А 09	010 Токарна з ЧПК																		
Б 10	Токарний верстат з ЧПК MAST ML 500x1000 SH8						2	15292	313	Р	1	1	1	110	10	15	2,6		
О 11	Підрізати торець.																		
Т 12	Різець прохідний упорний T-Max P DVJNR 2020K 16 з пластиною VNMG 16 04 04-MF 4425. Патрон токарний трьохкулачковий самоцентрувальний 120 мм, ISO 702-3 №4.																		
О 13	Точити зовнішній контур. Зняти фаску.																		
Т 14	1. Різець прохідний упорний T-Max P DVJNR 2020K 16 з пластиною VNMG 16 04 04-MF 4425. 2. Різець прохідний CoroTurn 107 QS-SDNCN1212E11 з пластиною DCMT 11 T3 08-PR 4425. Патрон токарний трьохкулачковий самоцентрувальний 120 мм, ISO 702-3 №4..																		
О 15	Точити торцеву канавку конусу канавку.																		
Т 16	Різець для обробки торцевих канавок CoroTurn XS CXS-06F150-6215AR 1025. Патрон токарний трьохкулачковий самоцентрувальний 120 мм, ISO 702-3 №4.																		
МК																			

Таблиця Г.2 – Операційна карта для операції 010 Токарна з ЧПК (виготовлення головки фрези кінцевої)

Дубл.																
Взам.																
Підп.																
						MI-12	ДП		2	1						
Розроб.	Ляшук			“КПІ ім. Ігоря Сікорського”, кафедра КМ												
Перевір.	Парненко															
Н.контр.				Головка фрези кінцевої										010		
Назва операції				Матеріал		Твердість	ОВ	МД	Профіль та розміри		МЗ	КВМ				
Токарна з ЧПК				Сталь 40X ДСТУ 7806:2015		HRC 45...48	кг	0,18	Ø22 x 43		0,13	1				
Обладнання, пристрій ЧПК				Позначення програми		То	Тв	Тпз	Тшт		МОР					
Токарний верстат з ЧПК MAST ML 500x1000 SH8				1111		2,4	0,7	5,0	3,1		5% емульсія Укрінол-1					
Р				III	Д або Ш	L		t	i	s	n	v				
01	Налагодження та обслуговування верстата з ЧПК здійснювати відповідно до паспорта та посібника з експлуатації.															
О 02	1. Підрізати торець, витримуючи розмір 1.															
Т 03	Різець прохідний упорний T-Max P DVJNR 2020K 16 з пластиною VNMG 16 04 04-MF 4425. Патрон токарний трьохкулачковий самоцентрувальний 120 мм, ISO 702-3 №4.															
Р 04	Чистовий прохід			1	43	1,5		1,5	1	0,15	1800	250				
05																
О 06	2. Точити контур, витримуючи розміри 2-13: чорновий прохід без радіусів, чистовий з радіусами. Зняти фаску 9.															
Т 07	1. Різець прохідний упорний T-Max P DVJNR 2020K 16 з пластиною VNMG 16 04 04-MF 4425. 2. Різець прохідний CoroTurn 107 QS-SDNCN1212E11 з пластиною DCMT 11 T3 08-PR 4425. Патрон токарний трьохкулачковий самоцентрувальний ISO 120 мм, 702-3 №4.															
Р 08	Чорновий прохід			2	22	25		1,0	1	0,3	1700	120				
Р 09	Чистовий прохід			1	20	25		0,3	1	0,15	2400	150				
10																

О 11	3. Точити торцеву конусну канавку, витримуючи розміри 14-18.									
Т 12	Різець для обробки торцевих канавок CoroTurn XS CXS-06F150-6215AR 1025. Патрон токарний трьохкулачковий самоцентрувальний 120 мм, ISO 702-3 №4.									
Р 13	Чистовий прохід	3	13	1	0,5	2	0,1	2500	100	
ОК										





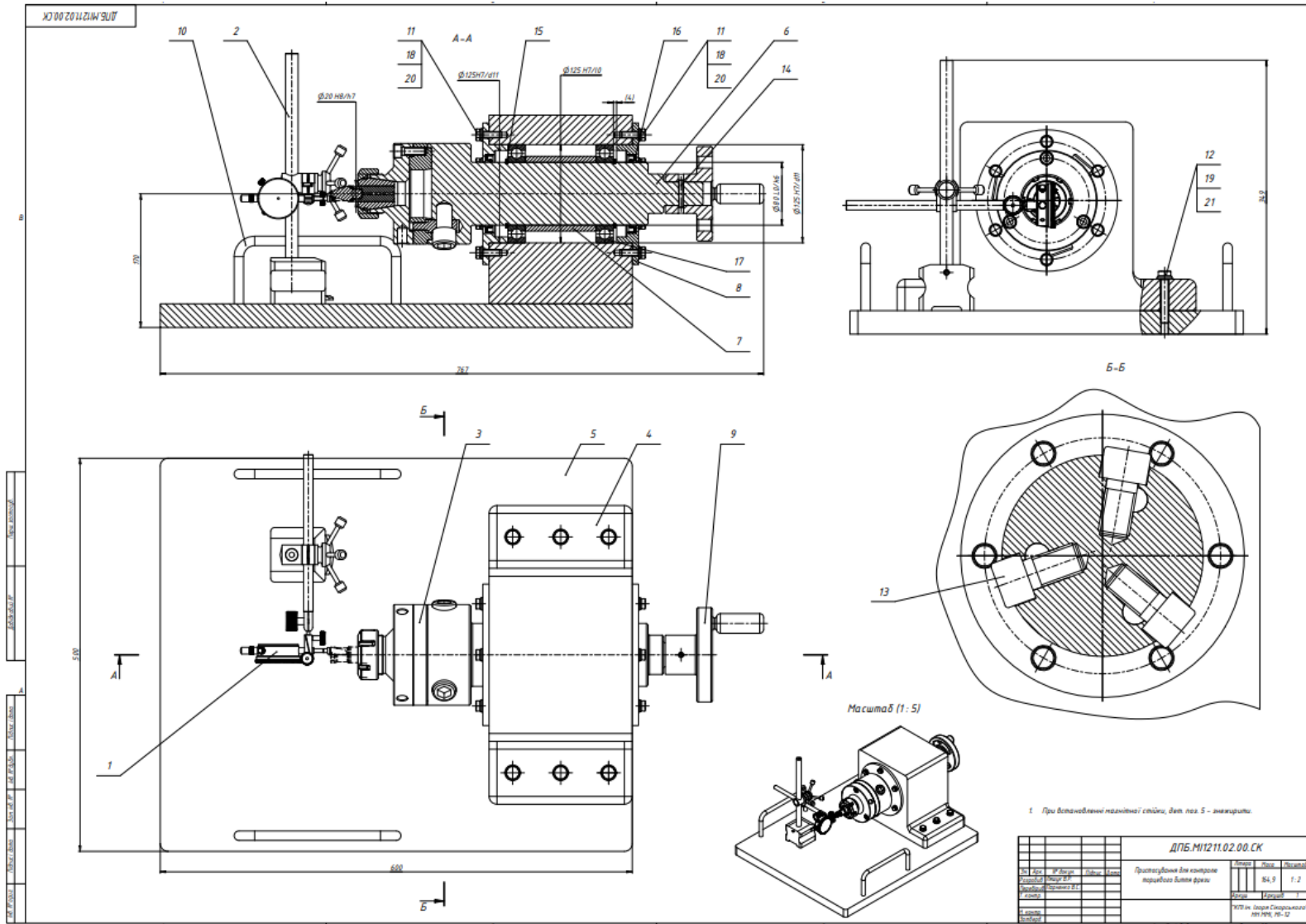
ДОДАТОК Г

Керуюча програма для операції 010 Токарна з ЧПК

(1001)	X1.014 Z-0.086
(T01 D=0 CR=0 - ZMIN=-27.5 - GENERAL TURNING)	G00 X26 Z0
(T02 D=0 CR=0 - ZMIN=-26.79 - GENERAL TURNING)	M09 M305
(T03 D=0 CR=0 - ZMIN=-2.5 - GROOVE TURNING)	G28 G91 Z0 G90
G00 G90 G40 G80 G94 G49 G97 G17	()
(FILE OUTPUT IN MM. PLEASE ENSURE THE UNIT IS SET CORRECTLY ON THE CONTROL)	(TURNING ALONG +X AXIS) G54 M01
G28 G91 Z0 G90	G90 G18 G95 N15 G100 T02 X21 Y0 G143 Z0.8 H02 G92 S2000 Q909
() (TURNING ALONG +X AXIS)	G96 P1 S120 M303 M08
M142 (ENABLE TURNING MODE) G54	G00 Z-1.4 X10.4
M442 (UNCLAMP A-AXIS) G00 A0.	G01 X9.8 F1 Z-23.739
M443 (CLAMP A-AXIS) G90 G18 G95	X9.845 Z-23.818 G03 X10.1 Z-24.768 I-1.645 K-0.95
N10 G100 T01 X26 Y0 G143 Z0 H01 G92 S2000 Q1530	G01 Z-26.433 X10.786 Z-26.79
G96 P1 S250 M303 M08	X11 X12 Z-25.79
G00 Z-0.086 X16	G00 X21 Z0.8
G01 X12.414 F1 X11 Z-1.5	M09 M305
X-0.4	G28 G91 Z0
G90	

()	()
(TURNING ALONG +X AXIS)	(TURNING ALONG +X AXIS)
G54	G54
M01	M01
G90 G18 G95	G90 G18 G95
N20 G100 T01 X21 Y0 G143 Z0 H01	N25 G100 T03 X10.75 Y0 G143 Z0 H03
G92 S2000 Q1137	G92 S2000 Q1481
G96 P1 S150 M303	G96 P1 S100 M303
M08	G01 X7.37 F1
G00 Z0.383	Z0.138
X9.541	X6.223 Z-1.5
G01 X9.083 F1	X6.026 Z-1.535
Z-1.617	X3.444 Z-2.474
X9.7 Z-2.234	X3.299 Z-2.5
Z-6.505	X-0.6
G03 X9.584 Z-7.385 I-3.4	X-2.014 Z-1.086
G01 X9.089 Z-9.234	Z-1.031
G02 X9 Z-9.907 I2.511 K-0.673	G00 Z0
G01 Z-22.9	X4.395
G02 X9.08 Z-23.2 I0.6	G01 X10.75 F1
G01 X9.812 Z-24.468	G28 G91 Z0
G03 X10 Z-25.168 I-1.212 K-0.7	G90
G01 Z-27.5	M141 (ENABLE MILLING MODE)
X11	M442 (UNCLAMP A-AXIS)
X12.414 Z-26.086	M444 (UNCLAMP C-AXIS)
G00 X21	G28 C0.
Z0	G100 T01
M09	G53 G00 X0 Y0
M305	M30
G28 G91 Z0	
G90	

ДОДАТОК Д СКЛАДАЛЬНИЙ КРЕСЛЕНИК ПРИСТОСУВАННЯ



СПЕЦИФІКАЦІЯ ДО СКЛАДАЛЬНОГО КРЕСЛЕНИКА ПРИСТОСУВАННЯ

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка			
				<u>Документація</u>					
A1			ДПБ.МІ1211.02.00.СК	Складальне креслення	1				
				<u>Складальні одиниці</u>					
		1		Індикатор годинникового типу Mitutoyo 2046E	1				
		2		Стійка індикаторна магнітна	1				
		3		Цанговий патрон ER40	1				
				<u>Деталі</u>					
		4	ДПБ.МІ1211.02.01	Корпус	1				
		5	ДПБ.МІ1211.02.02	Плита	1				
		6	ДПБ.МІ1211.02.03	Вал	1				
		7	ДПБ.МІ1211.02.04	Втулка проставочна	1				
		8	ДПБ.МІ1211.02.05	Кришка	2				
		9	ДПБ.МІ1211.02.06	Рукоятка оберտальна	1				
		10	ДПБ.МІ1211.02.07	Рукоятка рамна	2				
				<u>Стандартні вироби</u>					
		11		Болт М8 х 25 ISO 4017	12				
		12		Болт М10 х 60 ISO 4017	6				
			ДПБ.МІ1211.02.00						
			Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		
			Розроб.	Ліuzzi В.Р.					
			Перевір.	Париченко В.С.					
			Т.хонтр.						
			Н.хонтр.						
			Замб.						
			Пристосування для контролю торцевого біття фрези				Літера	Аркуш	Аркушів
								1	2
							КПІ ім. Ігоря Сікорського, НН ММІ, МІ-12		

Копіював

Формат А4

