

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»
Механіко-машинобудівний факультет
Кафедра технологій машинобудування та матеріалознавства

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеню магістра

студента Золотаренка Сергія Анатолійовича

академічної групи 131М-22Н-1 ММФ

спеціальності 131 Прикладна механіка

за освітньо-науковою програмою «Наскрізний інжиніринг
машинобудівного виробництва»

на тему: «Оптимальна автоматизована технологія виробництва
корпусу циліндричної фрези з урахуванням інженерного аналізу конструкції»

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від
_____ за № _____

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
Кваліфікаційної роботи	Дербаба В.А.			
розділів:				
Аналітичний	Дербаба В.А.			
Технологічний	Дербаба В.А.			
Спеціальний	Дербаба В.А.			
Науково- дослідницький	Дербаба В.А.			
Рецензент	Корсун В.І.			
Нормоконтролер	Дербаба В.А.			

ЗАТВЕРДЖЕНО:

завідувач кафедри

технологій машинобудування та матеріалознавства

_____ В.А. Дербаб
(підпис) (прізвище, ініціали)
«___» _____ 2024 року

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу

ступеню магістра

студенту Золотаренку Сергію Анатолійовичу

академічної групи 131М-22Н-1 ММФ

спеціальності 131 Прикладна механіка

**за освітньо-науковою програмою «Наскрізний інжиніринг
машинобудівного виробництва»**

**на тему: «Оптимальна автоматизована технологія виробництва
корпусу циліндричної фрези з урахуванням інженерного аналізу конструкції»**

**затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від
_____ за № _____**

Розділ	Зміст	Термін виконання
Аналітичний	Аналіз і характеристики матеріалу, умови експлуатації та оцінка технологічності деталі «Корпус циліндричної фрези»	29.01.2024- 25.02.2024
Технологічний	Проектування та опрацювання детальної технології механічної обробки. Розробка комплекту документації	26.02.2024- 24.03.2024
Спеціальний	Використовувані обладнання, пристосування при базуванні та контролю розмірів деталі	25.03.2024- 21.04.2024
Науково-дослідницький	Дослідження статичних навантажень конструкції деталі прикладною CAE-системою Solid Simulation	22.04.2024- 19.05.2024

Завдання видано _____ Дербаб В.А.

Дата видачі 15 січня 2024 р.

Дата подання до екзаменаційної комісії 06.05.2024

Прийнято до виконання _____ С.А.Золотаренко

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 47 с, 33 рис, 6 табл, 5 додатків, 25 джерел.

Актуальність. Поєднання механічних робіт на багатокоординатних верстатах з ЧПК набуло поширення в машинобудуванні. Тому визначення оптимальної технології та траєкторій руху керованих агрегатів має актуальне значення при металообробці. Також актуальною є проблема застосування інженерних розрахунків деталі в спеціалізованих програмах при складанні технології виготовлення виробу.

Мета. Дослідження та розв'язання науково-технічної задачі, пов'язаної з технологічним забезпеченням високопродуктивної механічної обробки деталі зі сталі шляхом оптимізації конструкції та управління її оброблюваністю інструментом на багатоцільових верстатах з ЧПК, за умов використання САД-САМ-САЕ систем.

Методика. Використання чисельного та графо-аналітичного методів дослідження з метою встановлення системного зв'язку параметрів точіння і фрезерування з властивостями оброблюваного матеріалу, геометрією інструменту та профілю деталі, параметрами режимів різання з відповідним зазначенням до керуючої програми для верстата з ЧПК.

Результати. Одержані чисельні результати досліджень для науково-обґрунтованого підходу у розв'язанні технічної задачі високопродуктивної токарно-фрезерної обробки деталей в САМ-системах, що містить сукупність скорегованих методик та алгоритмів для прогнозування їхньої оброблюваності із забезпеченням надійності різального інструменту з твердих сплавів. Отримані результати порівнювалися з відомими роботами, пов'язаними з дослідженнями процесів механічного оброблення різних матеріалів та параметрами розрахунків конструкцій деталі при статичних і динамічних навантаженнях прикладними інженерними системами.

Наукова новизна. Математико-статистичне опрацювання експериментальних даних дало змогу вперше одержати комплексні залежності в зручному для розрахунку й аналізу вигляді, які дають наочне уявлення про вплив кожного параметра процесу статичного навантаження складальної одиниці циліндричної фрези засобами програмного забезпечення.

Практична значимість. Методика обґрунтування оптимальних геометричних параметрах різальних інструментів та оснащення, установленні характеру впливу умов токарно-фрезерної обробки матеріалу на основні

показники процесу – час механічної обробки та режимні показники в залежності від твердості матеріалу деталі і інструментального матеріалу. Надані практичні рекомендації щодо оптимального використання CAE-системи Solid Simulation коригування режимними параметрами.

Ключові слова: точіння, фрезерування, верстат, сталь, інструментальний матеріал, технологія, ріжучий інструмент, режими різання, CAD, CAM, CAE.

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 Аналітичний розділ.....	7
1.1 Техніко-економічний аналіз вихідних даних. Службове призначення виробу. Конструктивна характеристика та технічні вимоги до вибору.....	7
1.2 Аналіз технологічності конструкції деталі.....	9
2 Технологічний розділ.....	14
2.1 Встановлення виробничої програми випуску деталей.....	14
2.2 Вибір і обґрунтування способу отримання заготовки.....	15
2.3 Проектування литої заготовки.....	18
2.4 Вибір технологічних баз вилівка.....	20
2.5 Розроблення технологічного маршруту виготовлення деталі.....	21
2.6 Вибір технологічного обладнання.....	21
2.7 Призначення режимів різання.....	25
3 Спеціальний розділ.....	28
3.1 Огляд модулів <i>SolidCAM</i>	28
3.2 Програмна реалізація обробки деталі в <i>SolidCAM</i>	34
4 Науковий розділ.....	37
4.1 Постановка проблеми.....	37
4.2 Розрахунок режиму різання для торцевого фрезерування досліджуваним корпусом циліндричної фрези зі змінними пластинами....	37
4.3 Симуляція навантаженого стану в доповненні <i>Simulation</i>	39
Висновок.....	45
Перелік посилань.....	46
Додаток А.....	49
Додаток Б.....	52
Додаток В.....	53
Додаток Г.....	74
Додаток Д.....	75

ВСТУП

Ключову роль у сучасному машинобудуванні відіграє *CAD (Computer-Aided Design)*, *CAM (Computer-Aided Manufacturing)* і *CAE (Computer-Aided Engineering)* технології.

CAD технології допомагають підвищити ефективність, точність та інноваційність під час розробки та виробництва виробів за рахунок створення, моделювання складних деталей у віртуальному середовищі.

CAM технології завдяки створенню коду керівної програми для верстатів з ЧПК, можливості оптимізувати параметри технологічного процесу обробки, віртуальному відтворенню процесу обробки підвищує ефективність, точність та автоматизацію виробництва.

CAE технології шляхом механічного, термічного аналізу, прогнозування фізичних явищ, оптимізацією моделі деталі покращує ефективність, надійність та інноваційність виробу.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Техніко-економічний аналіз вихідних даних. Службове призначення виробу. Конструктивна характеристика та технічні вимоги до вибору

З початку широкомасштабного нападу Російської Федерації на Україну за даними *GMK Center* [1] наприкінці лютого-березня багато металообробних підприємств зупинили виробництво та розв'язувати нагальні питання безпеки співробітників, логістики, проблеми поставки сировини і матеріалів і переміщення власне підприємства у віддалені місця від фронту.

Попри складне становище, розвиток металообробної галузі у науковій спільноті не зупинився. За пошуком «Металообробка» в Академії Гугл [2] у періоді 2022-2023рр., опубліковано понад 300 матеріалів, а у світовій базі наукової літератури «*Web of Science*» [3] за той самий період на запит «*Metalworking*» опубліковано 5 статей з України.

Технологія отримання чистових заготованок з економічно конструктивними формами і досі очолює розвиток технології механічної обробки.

У кваліфікаційній роботі для деталі «Корпус циліндричної фрези» методом отримання заготованки обрано лиття за виплавними моделями.

Цей метод наближає розміри заготованки до розмірів деталі, що зменшує час обробляння, кількість технологічних переходів, зношуваність різального інструмента, отже економить гроші на виробництві.

Деталь «Корпус циліндричної фрези» (далі корпус) є частиною складанної одиниці торцевої фрези, до якої кріпляться різальні пластини гвинтами.

Детальний аналіз застосування ротаційних інструментів у токарних операціях був зроблений, проте застосуванню їх для створення гладких поверхонь приділено обмежену увагу [4].

Торцеві фрези – це ротаційний інструмент, який використовують для оброблення плоских і ступінчастих поверхонь. Робочою частиною інструмента є торцева частина інструмента, відповідно вісь його обертання перпендикулярна до оброблюваної площини деталі. Найчастіше такі фрези досить масивні (рис.1.1), завдяки чому в них зручно використовувати змінні пластини [5].

Велика кількість зубців на ділянці контакту з деталлю дозволяє досягнути високої швидкості оброблення та плавності роботи інструмента. Фрези такого типу можуть бути як з прямими, так і з гвинтовими зубцями. Першими обробляють вузькі площини, а другі функціонують більш плавно, тому є універсальними.



Рисунок 1.1 – Торцеві фрези [6]

Осьові зусилля, що виникають за певних режимів роботи фрез із гвинтовими зубцями, бувають дуже високими. У такому разі використовують здвосні інструменти, зубці яких розміщені з різним напрямком нахилу. Завдяки цьому рішенню осьові зусилля, що виникають у процесі різання, урівноважуються.

Часто доцільно використовувати торцеві фрези з кутом в плані (рис.1.2). Кут різальних крайок впливає на напрям дії сили різання. Фрези з кутом у плані 45° часто є компромісним рішенням для загального застосування, тому що при цьому рівномірно розподіляються осьові та поперечні сили. Пропорційне відведення сили різання в осьовому напрямку значно підвищує

продуктивність, однак для тонкостінних деталей рекомендовано головний кут у плані 90° , щоб зменшити тиск на заготованку. Інша варіант – використовувати фрези з круглими пластинами. Круглі пластини спрямовують потік сили залежно від глибини подачі. Глибина різання половини діаметра круглої пластини відповідає головному куту в плані 45° [7].

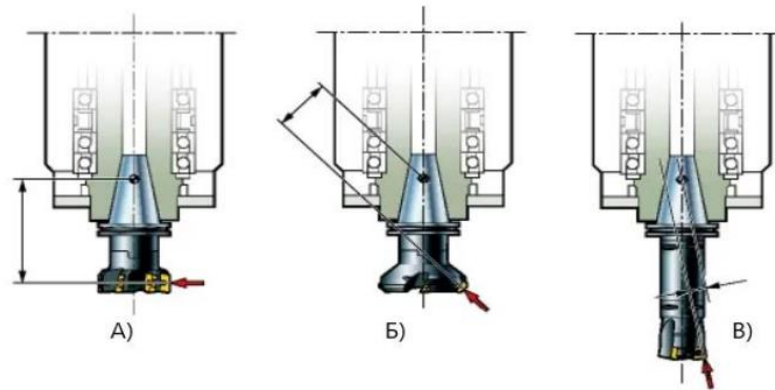


Рисунок 1.2 - Напрямок сил різання в залежності від головного кута в плані
А) – 90° , Б) – 45° , В) – 100° [8]

Конструктивно деталь «Корпус циліндричної фрези» є тілом обертання циліндричної та конічної форм. Має дві лиски для затискання, наскрізний центровий отвір з ділянкою нарізі для подавання змащувально-охолоджувальної рідини. Трьома зубцями з карманами для встановлення різальних пластин та трьома отворами з нарізю для фіксування пластин гвинтом.

Деталь повинна відповідати таким технічним вимогам: твердість корпусу має бути в межах $HRC\ 46-52$, невказані граничні відхилення розмірів $H14, h14, \pm \frac{IT}{2}$.

1.2 Аналіз технологічності конструкції деталі

Технологічність - це сукупність властивостей виробу, що визначають пристосованість його конструкції до досягнення оптимальних витрат ресурсів та реалізацію технологічного процесу під час його виробництва, ремонту та

утилізації за найбільш ефективною технологією з забезпеченням належного рівня якості виробу [9].

Поняття технологічності відносно, наприклад, в англomовній технічній літературі таких понять, як «технологічність», «експлуатаційна технологічність», «ремонтна технологічність», які отримані дослівним перекладом, не існує – замість терміна «технологічність» використовують терміни «DFM» – «*Design for manufacture*» або «*Design for Manufacturability*» (конструювання для виробництва) та «DFA» – «*Design for assembly*» (конструювання для складання). Інколи використовують і такий термін, як «DFMA» – «*Design for manufacture and assembly*» (конструювання для виробництва та складання) [10]. Тому розглянуто лише конструктивні елементи деталі та їхня можливість бути обробленими та вимірними.

Оцінено технологічність конструкції деталі за двома критеріями: якісним і кількісним. Елементи визначено нетехнологічними, що за заданих умов виробництва не можуть бути механічно обробленими з використанням фактичного обладнання та допоміжної оснастки підприємства.

Деталь має правильну геометричну форму. Виготовлена зі сталі 40Х ДСТУ 7806-2015 [1110]. Зубці корпусу розташовані під кутом 90°, що уможлиблює обробляння усіх стінок зубців. Усі поверхні деталі доступні для механічного обробляння. Під час обробляння поверхонь деталі інструмент можна вільно підводити. Шорсткість поверхні, точність розмірів, конфігурація деталі дозволяє використовувати стандартні різальні інструменти та виконувати обробляння на верстаті з ЧПК. Прості вимірювальні інструменти та пристосування можуть бути використані.

Технологічні конструктивні елементи деталі «Корпус циліндричної фрези»:

- Лиска 15x21,8;
- Центральний наскрізний отвір Ø8,5;
- Нарізь отвору M10,5-7H;
- Конусна поверхня із коефіцієнтом конусності 1:20;

- Карман під різальну пластину 11,61x11,64x4,3;
- Отвори під гвинти Ø3,3;
- Нарізь отворів М3,5-6Н.

Найбільш відповідальні поверхні мають 7-ий квалітет точності і параметр шорсткості Ra 0,8. Цих параметрів можна досягнути тонким точінням на сучасному верстаті з ЧПК.

Таблиця 1.1 – Хімічний склад сталі 40Х [11], %

C	Cr	Si	Mn
0,36-0,44	0,80-1,10	0,17-0,37	0,50-0,80

Таблиця 1.2 – Механічні властивості сталі 40Х після гартування і відпускання [11]

Границя плинності $\sigma_{п}$, Н/мм ²	Тимчасовий опір $\sigma_{т}$, Н/ мм ²	Відносне видовження δ_5 , %	Відносне звуження ψ , %	Ударна в'язкість, KCU , Дж/см ²
785	980	10	45	59

Кількісно оцінено деталь за критеріями: уніфікованості конструктивних елементів, точності обробки, шорсткості поверхонь. Кожен критерій описано формулою і якщо підраховані значення деталі «Корпус циліндричної фрези» будуть менші або більші за рекомендовані значення, то деталь за цим критерієм буде визначена як нетехнологічна або технологічна відповідно.

Основні поверхні та їхні параметри:

1. Лиска довжиною 7,6 мм, глибиною 3,4 мм, полем допуску $h14$, шорсткістю Ra 3,2.

2. Конусна поверхня із більшим діаметром 24,28 мм, полем допуску $h7$, конусністю 1:20, шорсткістю $Ra\ 3,2$, довжиною 22,99 мм.
3. Циліндрична поверхня діаметром 23,5 мм, полем допуску $h14$, шорсткістю $Ra\ 3,2$, довжиною 11,7 мм.
4. Циліндрична поверхня діаметром 44,9 мм, полем допуску $h14$, шорсткістю $Ra\ 3,2$, довжиною 23,3 мм.
5. Циліндрична поверхня діаметром 10,5 мм, полем допуску $h14$, шорсткістю $Ra\ 3,2$, довжиною 5 мм.
6. Циліндрична поверхня діаметром 8,5 мм, полем допуску $h14$, шорсткістю $Ra\ 3,2$, довжиною 60,99 мм.
7. Циліндрична поверхня діаметром 3,3 мм, полем допуску $h14$, шорсткістю $Ra\ 3,2$, довжиною 10,76 мм.
8. Карман довжиною 11,61 мм, шириною 11,64 мм, глибиною 4,3, полем допуску $h14$, мм, шорсткістю $Ra\ 3,2$.

Конструктивні елементи деталі:

1. Центральний наскрізний отвір з наріззю $M10,5-7H$;
2. Отвори з наріззю під гвинти $M3,5-6H$.

1. Коефіцієнт уніфікації конструктивних елементів [12].

$$K_{ye} = \frac{Q_{ye}}{Q_e} > 0,6, \quad (1.1)$$

де Q_{ye} – кількість уніфікованих елементів;

Q_e – загальна кількість елементів.

$$K_{ye} = \frac{21}{34} = 0,62 \quad (1.2)$$

Так як отримане значення коефіцієнта $0,62 > 0,6$, деталь технологічна за цим коефіцієнтом.

2. Коефіцієнт точності обробки [12].

$$K_{то} = 1 - \frac{1}{A_{cp}} > 0,8, \quad (1.3)$$

де A_{cp} – середній квалітет точності.

$$A_{cp} = \frac{\sum A_i Q_i}{Q}, \quad (1.4)$$

де $A_i = T_i$ – квалітет точності i -го розміру;

Q_i – кількість конструктивних елементів із квалітетом точності T_i ;

Q – загальна кількість розмірів деталі.

$$A_{cp} = \frac{2 \cdot 7 + 1 \cdot 6 + 31 \cdot 14}{34} = 13,3 \quad (1.5)$$

$$K_{то} = 1 - \frac{1}{13,3} = 0,92 \quad (1.6)$$

З огляду на отримане значення коефіцієнта $0,92 > 0,8$ деталь технологічна за цим коефіцієнтом.

3. Коефіцієнт шорсткості поверхні [12].

$$K_{ш} = \frac{1}{Ш_{cp}} < 0,32, \quad (1.7)$$

де $Ш_{cp}$ – середнє значення шорсткості поверхні деталі, мкм.

$$Ш_{cp} = \frac{\sum Ш_i n_i}{n_i}, \quad (1.8)$$

де $Ш_i$ – шорсткість оброблюваних поверхонь цієї деталі, мкм.

n_i – кількість поверхонь, що мають відповідне числове значення параметра Ra , мкм.

$$Ш_{cp} = \frac{3 \cdot 0,8 + 3 \cdot 1,0 + 22 \cdot 6,3}{28} = 5,14 \quad (1.9)$$

$$K_{ш} = \frac{1}{5,14} = 0,19 \quad (1.10)$$

Технологічно за цим коефіцієнтом.

Зважаючи на отримані значення коефіцієнтів уніфікації конструктивних елементів, точності оброблення та шорсткості поверхні, за кількісним критерієм деталь є технологічна.

Кресленик деталі «Корпус циліндричної фрези» наведено у Додатку А. Також у ньому наведено кресленик складанної одиниці та специфікацію.

2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Встановлення виробничої програми випуску деталей

На цій стадії проектування в якості вихідних даних для визначення виробничої програми випуску деталей та типу виробництва прийнято масу деталі, річну програму випуску, кількість деталей в одному виробі та відсоток деталей «Корпус циліндричної фрези», які призначено на запасні частини:

1. Маса деталі – 0,24 кг
2. Річна програма випуску – 2000 шт.
3. Кількість деталей в одному виробі – 1 шт.
4. Відсоток деталей як запасні частини – 2 %.

Виробничу програму випуску деталей встановлюють залежно від річної потреби виробів. На початковому етапі проектування технологічного процесу річну виробничу програму випуску деталі визначено за формулою:

$$N = N_B \cdot q \cdot \left(1 + \frac{h}{100}\right) = 2000 \cdot 1 \cdot \left(1 + \frac{2}{100}\right) = 2040 \text{ (шт/рік)}, \quad (2.1)$$

де N_B – річна програма випуску виробів;

q – кількість деталей в одному виробі;

h – відсоток деталей, призначених на запасні частини.

Основним показником, що характеризує серійне виробництво, є величина партії деталей, яку одночасно запускаються у виробництво (серіями запускають виріб, що складається з певних деталей). Розмір партії визначено за формулою:

$$n = \frac{N \cdot a}{\Phi} = \frac{2040 \cdot 3}{254} = 24,09 \approx 24 \text{ (шт.)}, \quad (2.2)$$

де a – періодичність запуску деталей у виробництво, днів;

Φ – кількість робочих днів у році, 254.

Такт випуску деталей:

$$t_B = \frac{60 \cdot F_d \cdot m}{N}, \quad (2.3)$$

де F_d – річний дійсний фонд роботи верстата, рік; якщо робота в одну зміну, то $F_d = 2030$ год;

m – кількість змін роботи верстата на добу;

N – річна програма випуску деталі, шт.

2.2 Вибір і обґрунтування способу отримання заготованки

З огляду на конфігурацію деталі «Корпус циліндричної фрези», а саме складну геометричну форму, обрано вид отримання заготованки – лиття.

Під час обирання способу лиття враховано тип виробництва, матеріал виливка, масу виливка, досягувану точність розмірів, шорсткість поверхні та коефіцієнт точності маси заготовки.

Для виготовлення виливків складної конфігурації з високою розмірною точністю з чорний сплавів застосовано спосіб лиття за виплавними моделями, позаяк інші способи отримання заготованки, а саме: в піщано-глинисті, оболонкові форми, відцентрове, лиття в кокіль і під тиском, - не задовольняють критерій маси, технологічні особливості конфігурації виливка, а саме тонкостінність та компактність, коефіцієнт точності маси заготованки, складність конфігурації виливка та матеріал деталі відповідно до перелічених вище способів лиття.

Литтям за виплавними моделями за умови серійного типу виробництва отримують дрібні, середні виливки складної конфігурації масою від декількох грамів до сотні кілограмів з параметром шорсткості поверхонь Rz 40-20 мкм.

Лиття за виплавними моделями – це багатоступінчастий процес, який починається з введення воску в матрицю малюнка для створення заготованки. Потім шаблони прикріплюють до воскових напрямних, щоб створити кластер.

Під час лиття за виплавними моделями спеціальна машина кілька разів занурює кластер у суспензію для формування керамічної оболонки, а потім

віск видаляють у паровому автоклаві. Далі керамічну оболонку обпалюють, а потім заповнюють розплавленим металом для створення деталі. Однією з переваг лиття за виплавними моделями є те, що віск можна використовувати повторно.

Таке лиття потребує металевої матриці (зазвичай з алюмінію), воску, керамічної суспензії, печі, розплавленого металу та інших машин, необхідних для впорскування воску, піскоструминного оброблення, вібраційного перекидання, різання та шліфування. Лиття за виплавними моделями основному складається з таких етапів: [13]

1. Виготовлення металевих матриць

На основі кресленника і вимог до виливка виготовляють металеву матрицю або форму, як правило, з алюмінію.

2. Впорскування воску

Впорскуючи розплавлений віск у готові матриці, отримують восковий шаблон.

3. Складання модельного блоку

Воскові шаблони прикріплюють до ливникової системи, яка зазвичай є набором каналів, через які розплавлений метал тече до порожнини форми.



Рисунок 2.1 - Складений модельний блок [13]

4. Формування виплавної моделі

Виплавну модель створюють шляхом занурення модельного блоку в керамічну ванну, а потім відразу кілька разів покривають піском.



Рисунок 2.2 – Висушування виплавної моделі [13]

5. Депарафінізація

Потім внутрішню порожнину, тобто восковий шаблон, депарафізують, що залишає порожнистий зовнішній шар керамічної оболонки.

6. Заливання та затвердіння

Керамічну оболонку попередньо розігрівають, щоб запобігти розтріскуванню керамічної оболонки, коли рідкий метал за високої температури заливають у порожнину.



Рисунок 2.3 – Охолодження та затвердіння [13]

7. Пиляння або різання

Після того, як метал охолоне і затвердіє, виливки видаляють з кластера дерева литникової системи струшуванням, різанням або розпилюванням окремого виливка.

8. Вторинне оброблення

Виливок шліфують або термічно обробляють, або залежно від вимог деталі механічно обробляють.

2.3 Проектування литої заготовки

Спершу встановлено норми точності до виливка за ДСТУ 8981:2020.

Таблиця 2.1 – Норми точності за ДСТУ 8981:2020 [14]

Норми точності	Лиття за виплавними моделями	
	Згідно з ДСТУ 8981:2020	Прийнято
Клас розмірної точності виливка	6-10	8
Ступінь жолоблення	4-7	5
Ступінь точності поверхні виливка	6-11	8
Значення шорсткості	Ra = 10	Ra = 10
Клас точності маси виливків	5т-11	8
Ряд припусків на оброблення виливків	3-6	4

Після прийняття норм точності встановлено допуски розмірів, припуски на оброблювані поверхні та розраховано розміри виливка.

Таблиця 2.2 – Розрахування розмірів заготованки

Розрахункові розміри, мм	Допуск розмірів, мм	Допуск форми, мм	Загальний допуск, мм	Припуск, мм	Розмір заготованки, мм
65,99	0,2	0,32	0,44	0,5	67±0,1
8	0,2	0,32	0,18	0,5	7,5±0,1
Ø10,5	0,2	0,32	0,18	0,5	Ø8,5±0,1
Ø8,5	0,2	0,32	0,18	0,5	Ø6,5±0,1
Ø44,9	0,2	0,32	0,44	0,5	Ø46±0,1
Ø21,8	0,2	0,32	0,44	0,5	Ø23,5±0,1
15	0,2	0,32	0,20	0,5	16,5±0,1
22,99	0,2	0,32	0,32	0,5	24±0,1
Ø24,24h7	0,2	0,32	0,32	0,5	Ø24,75±0,1
23,3	0,2	0,32	0,32	0,5	25,3±0,1
4,3	0,2	0,32	0,16	0,5	4,3±0,1
11,64	0,2	0,32	0,20	0,5	11,64±0,1
11,61	0,2	0,32	0,20	0,5	11,61±0,1

Радіус заокруглення зовнішніх кутів 1,5 мм, внутрішніх – 1,5 мм.

На підставі підрахованих даних про припуски на механічне оброблення, створено 3D-моделі деталі та вилівка з використанням програмного продукту *SolidWorks 2021*. За допомогою програми встановлено дійсні значення мас заготованки та деталі, позаяк одним з показників технологічності конструкції заготовки є коефіцієнт вагової точності, який визначається за формулою:

$$K_{в.т.} = \frac{G_d}{G_з} = \frac{0,24}{0,29} = 0,83 \quad (2.3)$$

де G_d - маса готової деталі;

$G_з$ - маса заготованки, що надходить із заготівельного цеху.

Кресленик заготованки наведено в Додатку Б.

2.4 Вибір технологічних баз вилівка

Вибрано технологічні бази спираючись на такі чинники:

- Правило стабільності баз
- Чистота, точність та протяжність оброблених поверхонь
- Наявність слідів від ливника

Такий підхід для вибору технологічних баз зменшить ймовірність виникнення браку на подальших операцій. Нижче наведено схеми базування для першого і другого встановлення.

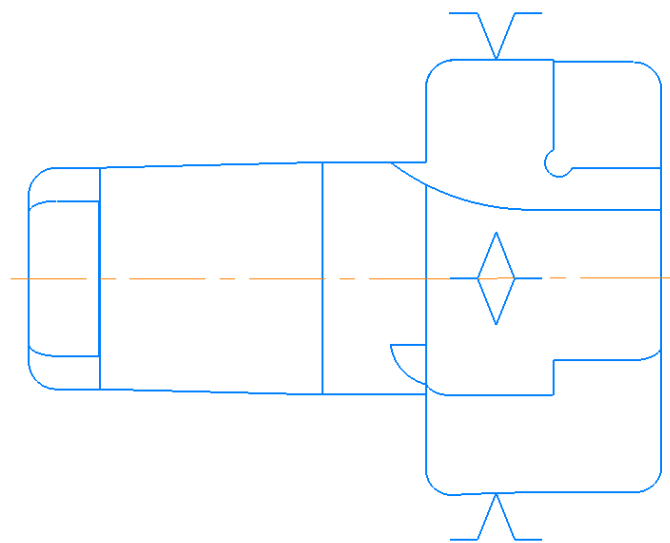


Рисунок 2.4 – Схема базування для першого встановлення

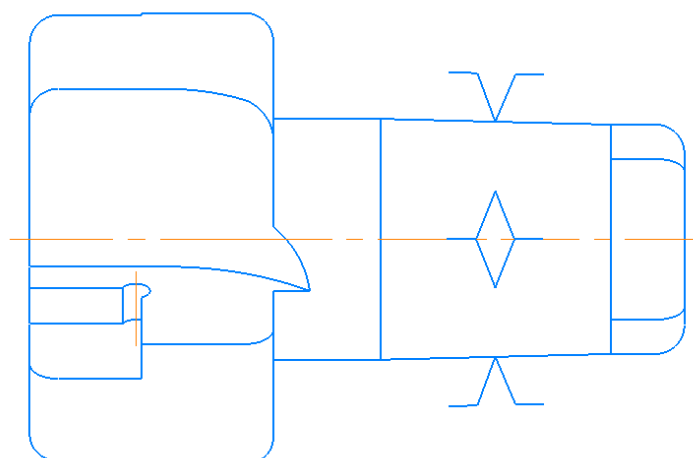


Рисунок 2.5 – Схема базування для другого встановлення

2.5 Розроблення технологічного маршруту виготовлення деталі

Щоб скласти раціональний технологічний маршрут оброблення вилівка «Корпусу циліндричної фрези» проаналізовано технічні вимоги до кожної оброблюваної поверхні деталі. Кількість технологічних операцій призначено, зважаючи на з необхідного квалітету розміру, значення параметра шорсткості й умов оброблюваності матеріалу.

Розроблено маршрут обробки деталі на підставі типового маршруту з урахуванням обраних технологічних баз. Перелік оброблюваних поверхонь і методи обробляння, що забезпечують виконання вимог кресленника зображено нижче.

Елемент державки	Метод оброблення	Операція	Назва інструмента	Подача	Швидкість	Час
Торець	Точіння	Чистова	DNMG 150408 NC5330 MCLNR 2525-P12	0,2	250	0:02
Шийки	Точіння	Чистова	DNMG 150408 NC5330 MCLNR 2525-P12	0,2	250	0:40
Лиски	Фрезерування	Чистова	Garant 20 2555	0,02	37	0:02
Осьовий отвір	Свердління	Свердління	Garant 12 2440	0,1	32	0:11
	Фрезерування	Чистова	Garant 20 2615	0,01	15	0:40
	Фрезерування	Різьбонарізання	Garant 27 2101	0,03	39	0:03

Рисунок 2.6 – Маршрут операцій на встановленні №1

Елемент державки	Метод оброблення	Операція	Назва інструмента	Подача	Швидкість	Час
Зуби державки	Фрезерування	Чистова	Garant 20 2720	0,01	50	1:55
Паз під пластину	Фрезерування	Чистова	Garant 20 1306	0,01	50	1:31
	Фрезерування	Чистова	Garant 20 1387	0,3	50	0:08
	Свердління	Свердління	Garant 12 2760	0,1	12	0:13
	Зенкерування	Фаска	Garant 20 3014	0,05	13	0:04
	Свердління	Різьбонарізання	Garant 20 2515	0,03	8	0:06
Торець	Фрезерування	Чистова	Garant 21 3058	0,4	150	0:05
Зуби державки	Фрезерування	Чистова	Garant 12 2793	0,03	50	1:02
		Фаска	Garant 20 3020	0,2	15	0:18
Осовий отвір	Свердління	Свердління	Garant 12 2440	0,15	35	0:04

Рисунок 2.7 – Маршрут операцій на встановленні №2

2.6 Вибір технологічного обладнання

Щоб виконати технологічний маршрут оброблення заготовки «Корпус циліндричної фрези», а саме операції точіння свердління та фрезерування, обрано технологічне обладнання з вертикальним розміщенням осі шпинделя, контршпинделем для перехвату деталі та прискорення обробляння виливків у наслідок циклічності обробляння паралельно на двох

шпинделях двох заготованок. Приділено увагу розміру робочої зони верстата для виконання усіх технологічних переходів. Токарно-фрезерний верстат *MAZAK INTEGREX 200-IV ST* забезпечує усі вищеперераховані аспекти вибору верстата.

Вибір технологічного обладнання проведено за його головними параметрами, які характеризують його функціональне значення і технологічні можливості. Ці параметри наведено нижче.

Таблиця 2.3 – Основні характеристики токарно-фрезерного верстата *MAZAK INTEGREX 200-IV ST*

Параметри обробки	
Діаметр патрона	200 мм
Максимальний оброблюваний діаметр (верхня/нижня головка)	600 мм/260 мм
Переміщення вздовж осей X/Y/Z/W (верхня головка)	580/160/1045,1545 мм/ 225°
Переміщення вздовж осей X/Y/Z/W (верхня головка)	150/990,1490 мм
Місткість магазину (верхня/нижня головка)	20/9
Основний шпиндель	
Частота обертання	5000 об/хв
Потужність	22 кВт
Контршпиндель	
Частота обертання	5000 об/хв
Потужність	18,5 кВт
Система ЧПК	
Система ЧПК	<i>Mazatrol Matrix</i>
Габарити	
Довжина	5200 мм
Ширина	2550 мм
Висота	2600 мм
Маса	14000 кг

S – оснащений контршпинделем.

T – оснащений револьверною головкою.



Рисунок 2.8 – Зовнішній вигляд *MAZAK INTEGREX 200-IV ST* [15]



Рисунок 2.9 – Основний шпиндель та револьверна головка *MAZAK INTEGREX 200-IV ST* [15]



Рисунок 2.10 – Контршпиндель та фрезерна головка *MAZAK INTEGREX 200-IV ST* [15]

Компанію *Yamazaki Mazak* було засновано в 1919 році у Японії. Вона робить свій внесок у розвиток верстатобудівної промисловості як провідна світова компанія. *Yamazaki Mazak* виробляє не лише передові верстати, такі як багатоосьові центри, токарні центри з ЧПК, оброблювальні центри та машини для лазерної обробки, але й системи автоматизації з концепцією «за раз» для підтримки глобального виробництва, забезпечуючи виняткову продуктивність і універсальність. [16]

Компанію представлено у багатьох країнах світу, зокрема США, Великобританії, Сінгапурі, Китаї, Індії тощо.



Рисунок 2.11 – Представництво компанії у Великобританії [16]

Верстат працює на фірмовій системі ЧПК *MAZAK – Mazatrol Matrix*. Можливостями цієї системи ЧПК є 5-осьове обробляння, підтримка зміщення деталей, підтримка корекції інструменту, інтеграція даних інструменту, повномашинне моделювання, підтримка *G*-коду, сумісного з *FANUC*, легка зміна даних *G10*, інтеграція з *Microsoft* та *Windows*. [17]



Рисунок 2.12 – Інтерфейс *Mazatrol Matrix* [15]

2.7 Призначення режимів різання

Призначення режимів різання – найбільш відповідальний етап проектування, що визначає продуктивність технологічного процесу і трудомісткість обробки. Завдяки підбраному високотехнологічному різальному інструментові з різальними пластинами з твердого сплаву було досягнуто високої продуктивності технологічного процесу.

Для токарних операцій використано різальні пластини компанії *Korloy*.

Форму пластин визначено за контуром оброблюваної поверхні, тому для обробляння деталі «Корпус циліндричної фрези» використано ромбічні пластини 55° . Для чистового типу операції точіння обрано сплави для пластин, що найбільш придатні для виконання операцій – *NC5330*, що

характеризуються достатньою зносостійкістю, щоб працювати зі значеннями швидкості різання – 250 (м/хв) та подачею – 0,35 (мм/об).

Завдяки прогресивній технології функціонального покриття робочих поверхонь різальних пластин – *CVD (Chemical Vapor Deposition)* – підвищується зносостійкість інструмента, що уможлиблює обрані режими різання для оброблення виливка.

Для формоутворення лиски використано кінцеву фрезу компанії *Hoffman Group*, яка працює з подачею на зуб – 0,02 (мм/зуб) та швидкістю різання – 37 (м/хв).

Для свердлення осьового отвору використано свердло з каталогу компанії *Hoffman Group*, яка працює зі швидкістю різання – 32 (м/хв) та подачею – 0,1 (мм/зуб).

Для розфрезерування отвору на більший діаметр використано кінцеву фрезу, що працює з подачею на зуб – 0,02 (мм/зуб) та швидкістю різання – 15 (м/хв).

Для нарізання нарізі в отворі використано мітчик, який працює зі швидкістю різання – 39 (м/хв) та подачею – 0,01 (мм/зуб).

Для фрезерування зубів корпусу обрано кінцеву фрезу, яка працює з подачею на зуб – 0,01 (мм/зуб) та швидкістю різання – 37 (м/хв).

Для фрезерування пазу під пластину використано кінцеві фрези з режимами різання 22 (м/хв) – швидкість, 0,03 (мм/зуб) – подача та 7 (м/хв) – швидкість, 0,3 (мм/зуб) – подача.

Для свердлення отвору та нарізання нарізі під фіксування пластини використано свердло та мітчик з режимами різання – 12 (м/хв) – швидкість, 0,1 (мм/зуб) – подача та 7 (м/хв) – швидкість, 0,05 (мм/зуб) – подача відповідно.

Для знімання фаски використано зенкер, який працює зі швидкістю різання – 13 (м/хв) та подачею – 1 (мм/зуб).

Для торцювання виливка використано торцеву фрезу з режимом різання 150 (м/хв) – швидкість, 0,4 (мм/зуб) – подача.

Для фрезерування та знімання фаски використано кінцеву фрезу та
зенкер, які працюють з режимами різання: швидкістю – 37 (м/хв), подачею –
0,03 (мм/зуб) та швидкістю – 15 (м/хв), подачею – 0,2 (мм/зуб).

Для свердління осьового отвору використано свердло з режимом
різання: 32 (м/хв) - швидкість, подачею – 0,15 (мм/зуб).

Обрані режими різання є дещо меншими ніж режими різання із каталогів
Korloy та *Hoffman Group*.

У Додатку В подано технологічний процес обробки деталі «Корпус
циліндричної фрези».

3 СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

3.1 Огляд модулів *SolidCAM*

Токарно-фрезерне оброблення у *SolidCAM*

SolidCAM пропонує комплексне рішення для передових багатоінструментальних/багатошпіндельних токарно-фрезерних верстатів з ЧПК.

Сучасні токарно-фрезерні верстати з ЧПК призначені для того, щоб об'єднати якомога більше фрезерних і токарних операцій, щоб обробляти заготовки з максимальною продуктивністю.

Ручне програмування обробки деталей зі складною геометрією безпосередньо за стійкою є непродуктивним – якщо це взагалі можливо –, схильним до помилок і дорогим.

Стандартні токарно-фрезерні верстати з ЧПК, які підтримує *SolidCAM* (рис. 3.1): *Chiron FZ08MT*, *Mazak Integrex 400S*, *INDEX G200*, *Viktor VMT X200*, *Nakamura Tome WY100*, *DMGMori CTX beta 2000TC*, *Doosan Puma 2600M*, *HAAS ST20Y*, *Takisawa NEX 110* тощо. [18]



Рисунок 3.1 – Стандартні токарно-фрезерні верстати у *SolidCAM* [18]

В інтерфейсі користувача *SolidCAM*, який інтегрований в *SolidWorks*, можна програмувати фрезерні та токарні операції на головному і контршпинделі, керувати інструментальними супортами, задньою бабкою тощо (рис. 3.2).

Фрезерні операції містять унікальну та запатентовану технологію *iMachining*, доступну лише у *SolidCAM*.

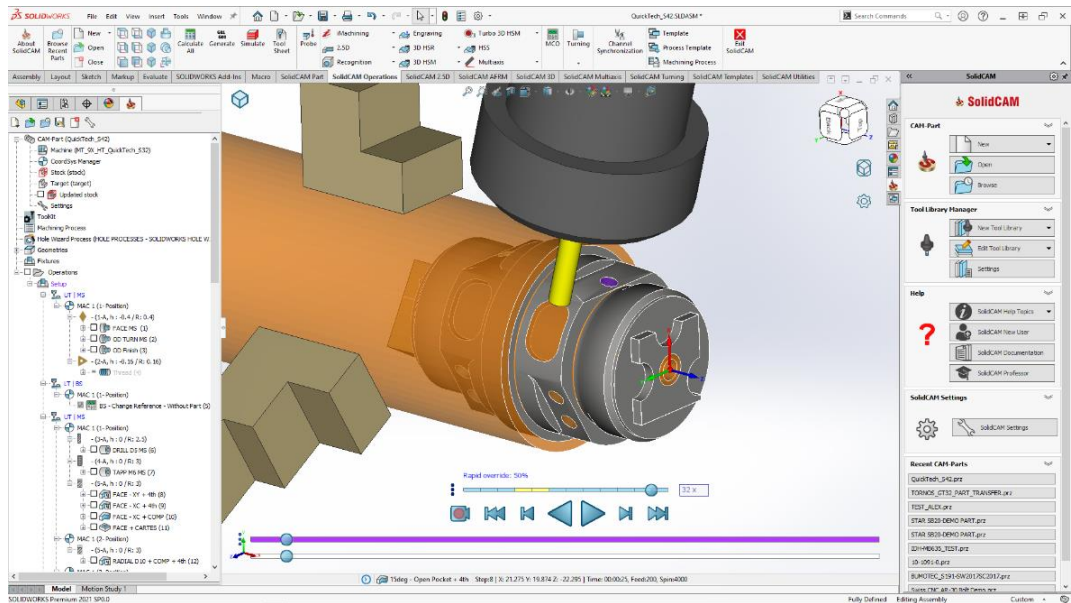


Рисунок 3.2 – Інтерфейс програми *SolidCAM* [18]

Менеджер інструментів у середовищі *CAM* дозволяє зберігати, збирати та керувати інструментами, умовами різання в середовищі машини (*Machine Preview*) за допомогою зручного інтерфейсу (рис. 3.3).

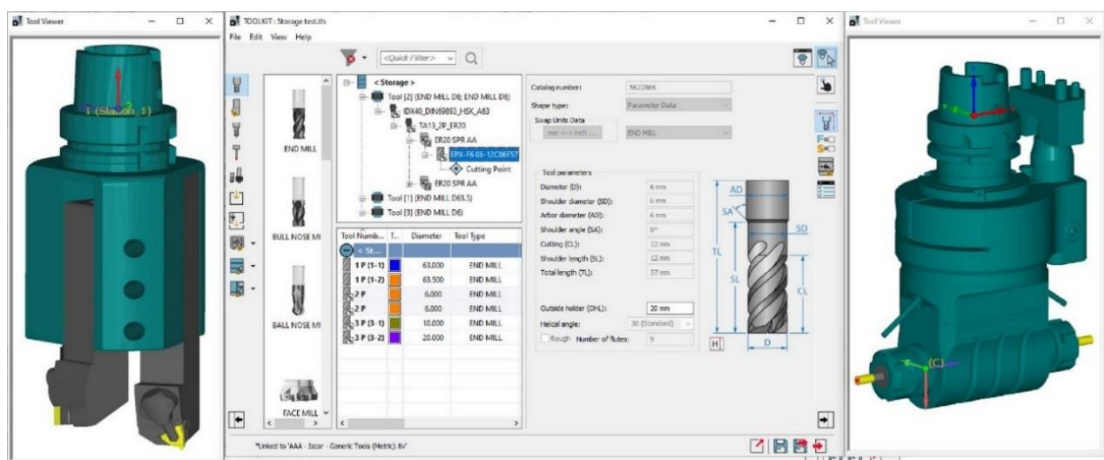


Рисунок 3.3 – Вікно налаштування різального інструмента [18]

Набір інструментів підтримує будь-які типи торцевих, осьових, кутових і багаторіцевих тримачів, не залишаючи зазорів для підтримки розширених вимог до токарно-фрезерного інструмента (рис. 3.4).

Будь-який з компонентів інструмента можна безпосередньо імпортувати як CAD-моделі з онлайн-каталогу виробника інструменту.

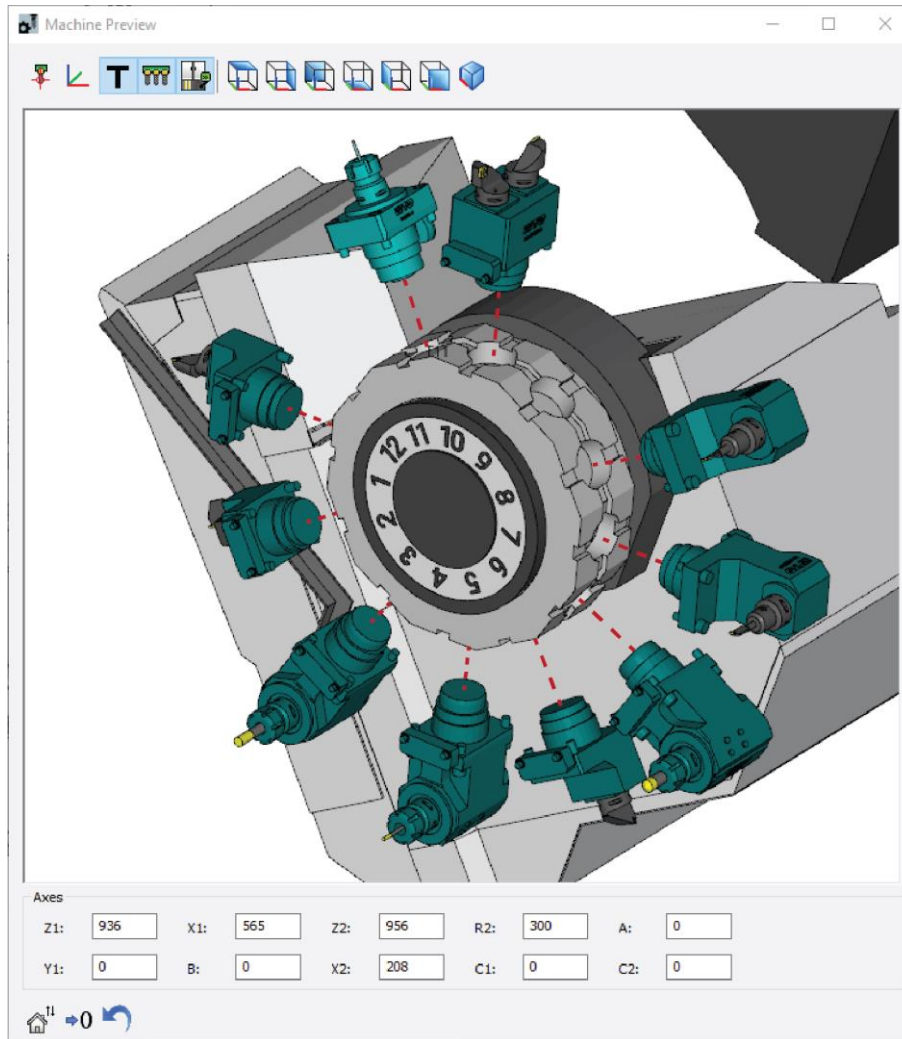


Рисунок 3.4 – Налаштування положення інструмента [18]

За допомогою модулю контролю установлень верстата (КУВ) можна визначати дії машини, які не орієнтовані на траєкторію руху інструменту (наприклад, рухи револьверних головок і шпинделів, відкриття/закриття патронів, охолоджувальні рідини тощо) (рис. 3.5).

Токарно-фрезерні постпроцесори оснащені вже готовими стандартними циклами КУВ, що економить час на програмування деталей. Цикли

складаються з параметрів, які вимагають мінімального втручання користувача для виконання необхідних дій машини. За допомогою КУВ програмувати:

- Зміну інструмента
- Рухи вузлів машини
- Перехват деталі
- Затискання/розтискання пристосування
- Контроль охолоджувальних рідин
- Режими роботи машини
- Осі та синхронізація фаз
- Вивести будь-яку команду *G/M*

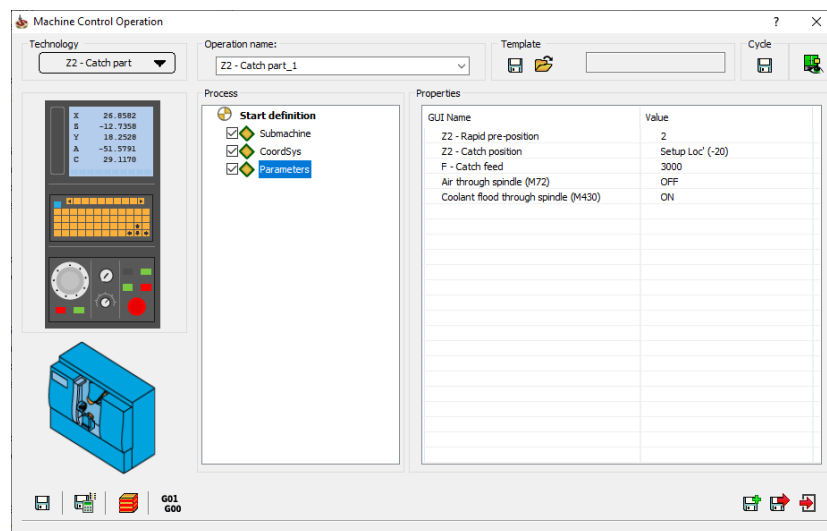


Рисунок 3.5 – Налаштування модуля контролю установлень верстата [18]

Машинна симуляція моделює шлях інструмента перед фактичним оброблянням. З допомогою цього програмного забезпечення можна виявити зіткнення між компонентами машини, заготованкою, пристосуваннями, інструментами та оправками (рис. 3.6).

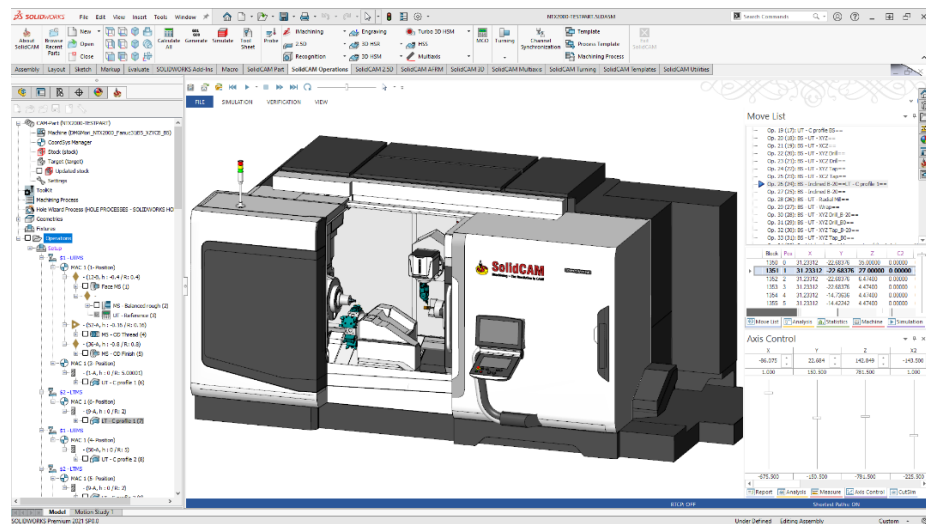


Рисунок 3.6 – Машинна симуляція обробки [18]

Зручний менеджер синхронізації каналів, проводить через порядок операцій, показує зіткнення та допомагає їх уникати (рис. 3.7).

Через цей модуль можна синхронізувати та оптимізувати всі операції обробки для максимальної продуктивності.

SolidCAM може керувати необмеженою кількістю каналів і підтримує будь-яку кількість функцій машини та режимів різання.

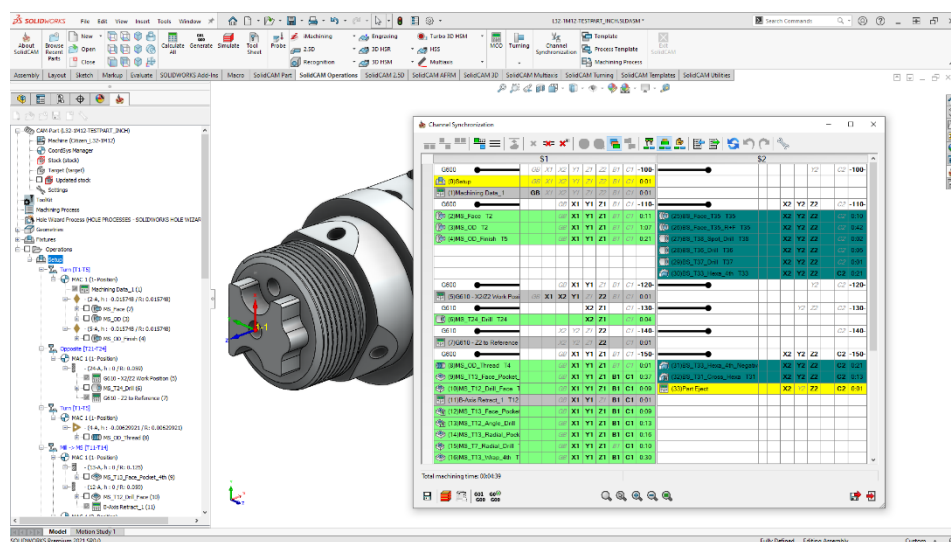


Рисунок 3.7 – Менеджер синхронізації каналів [18]

Спільне використання осі або приводу скорочує час оброблення та стабілізує технологічну систему. Синхронізація двох переходів точіння на різних супортах інструмента зі своїми режимами різання, включення одного і

того ж шпинделя, синхронізація двох фрезерних переходів на різних супортах, але однієї і тієї ж осі обертання (рис. 3.8).

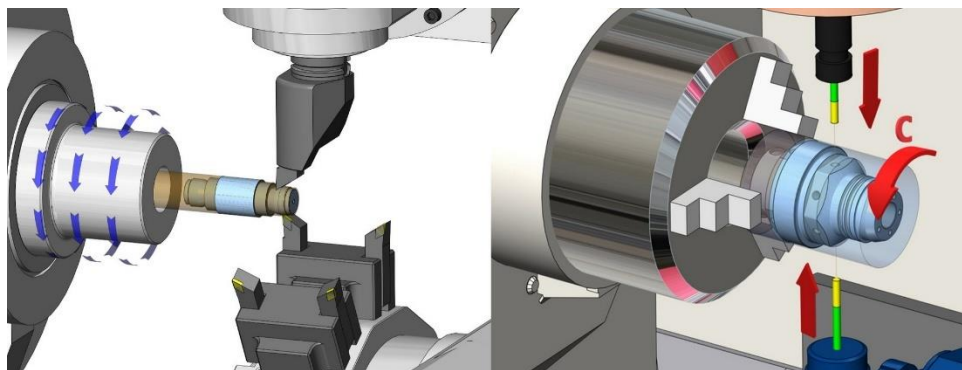


Рисунок 3.8 – Синхронізування операцій на револьверній та фрезерній головках [18]

Запатентована технологія *iMachining* від *SolidCAM* – це інтелектуальна високошвидкісна технологія фрезерування, яка дозволяє створювати значно швидші та безпечніші шляхи інструменту, мінімізуючи час налаштування та знос інструменту. Функції та алгоритми *iMachining* забезпечують високе скорочення тривалості циклу та подовження терміну служби інструменту, забезпечуючи ідеальну подачу та швидкість оброблення.

Переваги *iMachining*:

- Менша кількість проходів за рахунок збільшеної глибини.
- Повністю оптимізована подача та швидкість забезпечують максимальну продуктивність інструменту.
- Оброблення залишкового матеріалу і фінішне оброблення усувають «різання повітря» та непотрібні рухи інструменту.
- Уникання простою машини – менший знос верстатів з ЧПК призводить до збільшення часу роботи, менших витрат на технічне обслуговування та довшого терміну служби ЧПК.

Технологія *iMachining* від *SolidCAM* стала об'єктом дослідження у статтях закордонних науковців, зокрема у статті [19] порівнюють дві обробки алюмінієвого сплаву *ENAW 70705*: згенерований технологією *iMachining* і створений від авторів. У висновках стверджено, що на 85% ефективність

оброблення за технологією *iMachining* більша, ніж звичайне механічне оброблення, хоча значення шорсткості поверхонь Ra і Rz були дещо нижчими.

У статті [20] обґрунтовано оптимальність використання технології *iMachining* для фрезерування. Обробляючи деталь із алюмінієвого сплаву *EN AW 5754*, за цією технологією автори стверджують зменшення часу на обробку усіх операцій на 15,9% також зауважують, що цю технологію можна використовувати без збільшення припусків на бічні поверхні деталі.

Стаття [21] описує продуктивності різання та зносу інструментів з покриттям і без покриття під час оброблення за технологією *iMachining*.

У висновках автори зазначають, що *AlTiCN* має більш високе значення мікротвердості й адгезії і більш низьке значення швидкості зносу, ніж *CrCN*. Також було визначено, що інструменти, покриті тонкою плівкою *AlTiCN*, мають чудові властивості як з погляду втрати маси, так і з погляду ширини зносу крайок після механічного оброблення.

3.2 Програмна реалізація обробки деталі в *SolidCAM*

Спершу в програму *SolidCAM* імпортовано моделі деталі та заготовки «Дежавки» як складанну одиницю. Визначено системи координат, верстат та власне операцію механічної обробки.

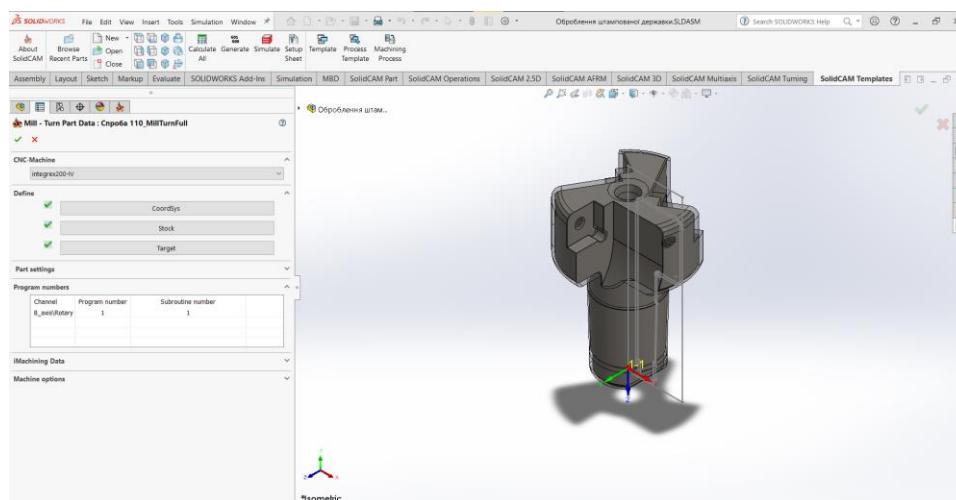


Рисунок 3.9 – Початкові налаштування у *SolidCAM*

У подальшому створено операції точіння, фрезерування, свердління, нарізання нарізі згідно з операційною картою. Під час цього створено різальні крайки та державки згідно з обраними інструментами із каталогів *Korloy* та *Hoffman*. Установлено режими різання, які зазначено у другому розділі (рис. 3.10).

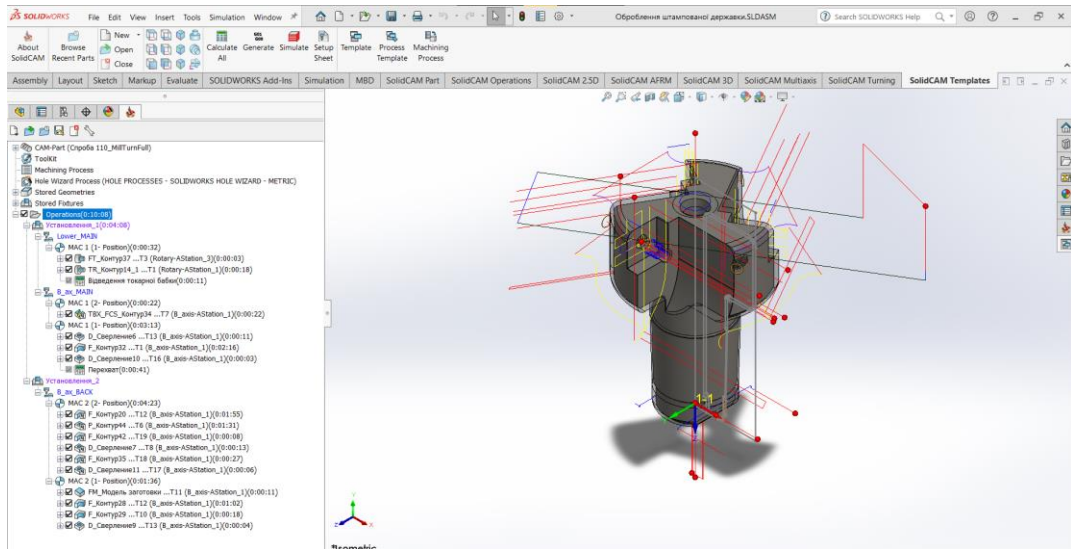


Рисунок 3.10 – Перелік операцій та їхні траєкторії на моделі

Під час машинної симуляції підбрано оптимальну довжину вильоту усіх інструментів, щоб уникнути удару у середовищі верстата.

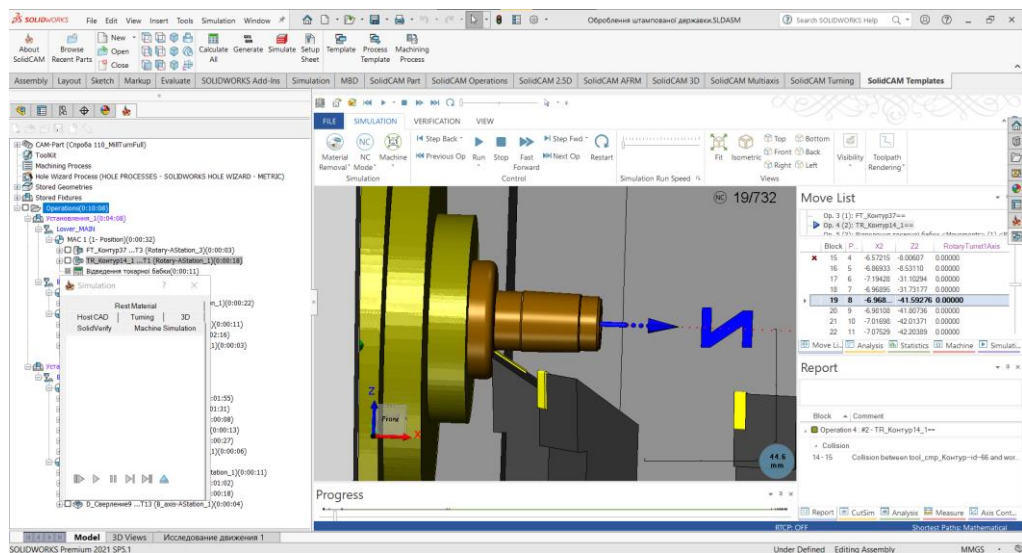


Рисунок 3.11 – Машинна симуляція повздожнього точіння

За допомогою вбудованої перевірки залишкового матеріалу оцінено якість оброблення деталі «Корпус циліндричної фрези». Жовтим кольором виділено поверхні, які не мають припуску відносно деталі. Зелений колір означає, що на виділених поверхнях є припуск 0,01 мм.

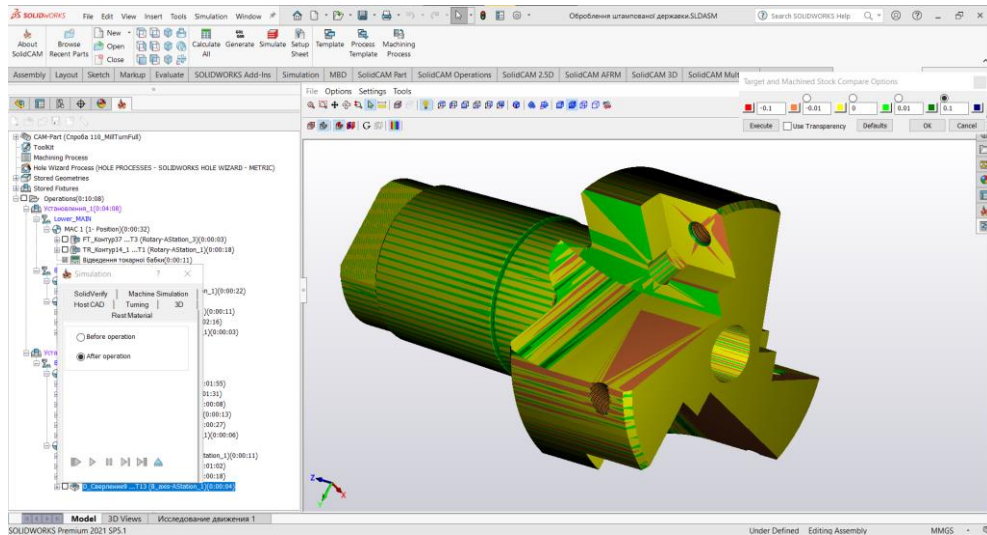


Рисунок 3.12 – Порівняння обробленої деталі із моделлю деталі

Програма *SolidCAM* дозволяє створити технологічну документацію, що наведена у додатку Б, а саме: інструментальну карту, у якій зазначено всі використані інструменти, маршрутну карту, де зазначено порядок операцій, їхню тривалість та режими різання.

Обробивши заготованку в програмі *SolidCAM*, ми отримали можливість створити код виконавчої програми, який можна використати під час налагоджування верстата для подальшого автоматизованого оброблення. Код виконавчої програми та деякі технологічні операції наведено у Додатку Г.

4 НАУКОВИЙ РОЗДІЛ

4.1 Постановка проблеми

За допомогою комп'ютерних програм можна моделювати експерименти, які за реальних умов провести немає змоги, одна з таких програм – це доповнення *Simulation* до *SolidWorks*.

На основі методу скінченних елементів, з яким працює доповнення *Simulation*, написано не одна стаття у *Web of Science*. Метод полягає у розбиванні на скінченну кількість елементів, всередині кожного з яких задають деякі функції форми, які дають змогу визначити шукану функцію всередині елемента за її значеннями вузлів. [22]

У стаття [23] розроблено серію нових сплавів $Al-1Fe-0,6Cu-xZr$ без тріщин, використовуючи метод скінченних елементів. Вміст *Zr* має значний вплив на технологічність такого сплаву.

У статті [24] методом скінченних елементів спрогнозовано утворення тріщин на межі суцільної опори зуба під час навантаження.

У статті [25] досліджено деформацію та поведінку частинок під час покривання алюмінію. Методом скінченних елементів встановлено, що збільшення швидкості або розміру частинок на поведінку осадження впливає однаково, міцність зв'язування покриття порошку з дрібними частинками була більшою, ніж порошку з великими частинками.

Ми використали *SolidSimulation* для того, щоб дізнатися значення навантаження, яке сприймає корпус циліндричної фрези під час торцевого фрезерування.

4.2 Розрахунок режиму різання для торцевого фрезерування досліджуваним корпусом циліндричної фрези зі змінними пластинами

Вихідні дані:

Матеріал оброблюваної заготовки – СЧ30

Межа міцності матеріалу заготовки – $\sigma_B = 400$ МПа

Ширина оброблюваної поверхні заготовки – $B = 30$ мм

Довжина оброблюваної поверхні заготовки – $L = 450$ мм

Тип верстата - токарно-фрезерний *MAZAK INTEGREX 200-IV ST*

Таблиця 4.1 – Основні характеристики токарно-фрезерного верстата *MAZAK INTEGREX 200-IV ST*

Параметри обробки	
Діаметр патрона	200 мм
Максимальний оброблюваний діаметр (верхня/нижня головка)	600 мм/260 мм
Переміщення вздовж осей X/Y/Z/B (верхня головка)	580/160/1045,1545 мм/ 225°
Переміщення вздовж осей X/Y/Z/B (нижня головка)	150/990,1490 мм
Місткість магазину (верхня/нижня головка)	20/9
Основний шпиндель	
Частота обертання	5000 об/хв
Потужність	22 кВт
Контршпиндель	
Частота обертання	5000 об/хв
Потужність	18,5 кВт
Система ЧПК	
Система ЧПК	<i>Mazatrol Matrix</i>
Габарити	
Довжина	5200 мм
Ширина	2550 мм

Висота	2600 мм
Маса	14000 кг

S – оснащений контршпинделем.

T – оснащений револьверною головкою.

1. Сила різання P_z дорівнює:

$$P_z = \frac{10 * C_p * t^x * S_z^y * B^u * z}{D^q * n_d^w} * K_{mp}, \quad (4.1)$$

де K_{mp} – поправковий коефіцієнт, що дорівнює:

$$K_{mp} = K_{ml} * K_{mu} * K_{mt} * K_{m\phi} \quad (4.2)$$

K_{ml} – коефіцієнт, що враховує вплив фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу і дорівнює:

$$K_{ml} = 1 * \left(\frac{750}{\sigma_B}\right)^1 = 1 * \left(\frac{750}{400}\right)^1 = 1,875 \quad (4.3)$$

K_{mu} – коефіцієнт, що враховує стан поверхні заготованки, $K_{mp} = 1$

K_{mt} – коефіцієнт, що враховує матеріал різальної частини, $K_{mp} = 1,25$

$K_{m\phi}$ – коефіцієнт, що головний кут у плані різця, $K_{mp} = 1$

$$K_{mp} = 1,875 * 1 * 1,25 * 1 = 2,34 \quad (4.4)$$

З урахуванням таких коефіцієнтів сила різання дорівнює:

$$C_p = 340; x = 1; y = 0,75; u = 1,1; z = 3; q = 1,3; w = 0,2.$$

$$P_z = \frac{10 * 340 * 1,8^1 * 0,15^{0,75} * 30^{1,1} * 3}{45^{1,3} * 250^{0,2}} * 2,34 = 1027,8 \text{ (Н)} \quad (4.5)$$

2. Крутний момент на шпинделі $M_{кр}$ дорівнює:

$$M_{кр} = \frac{P_z * D}{2 * 100} = \frac{1027,8 * 45}{1020 * 60} = 231,3 \text{ 9 (Н * м)} \quad (4.6)$$

3. Ефективна потужність різання N_e дорівнює:

$$N_e = \frac{P_z * v}{1020 * 60} = \frac{1027,8 * 300}{1020 * 60} = 5,03 \text{ (кВт)} \quad (4.7)$$

Потужність верстата *MAZAK INTEGREX 200-IV ST* за паспортом 22 кВт, тому розрахований режим різання задовольняє паспортним даним верстата.

4.3 Симуляція навантаженого стану в доповненні *Simulation*

Для симулювання торцевого фрезерування використано доповнення *SolidWorks – Simulation*. Спершу відкрито файл складальної одиниці торцевої фрези зі змінними пластинами. Далі створено сітку (рис. 4.1) з такими характеристиками:

Розмір елемента – 3,20211 мм

Допуск розміру елемента – 0,160106 мм

Отримано таку сітку:

Кількість вузлів: 26040

Загальна кількість елементів: 15322

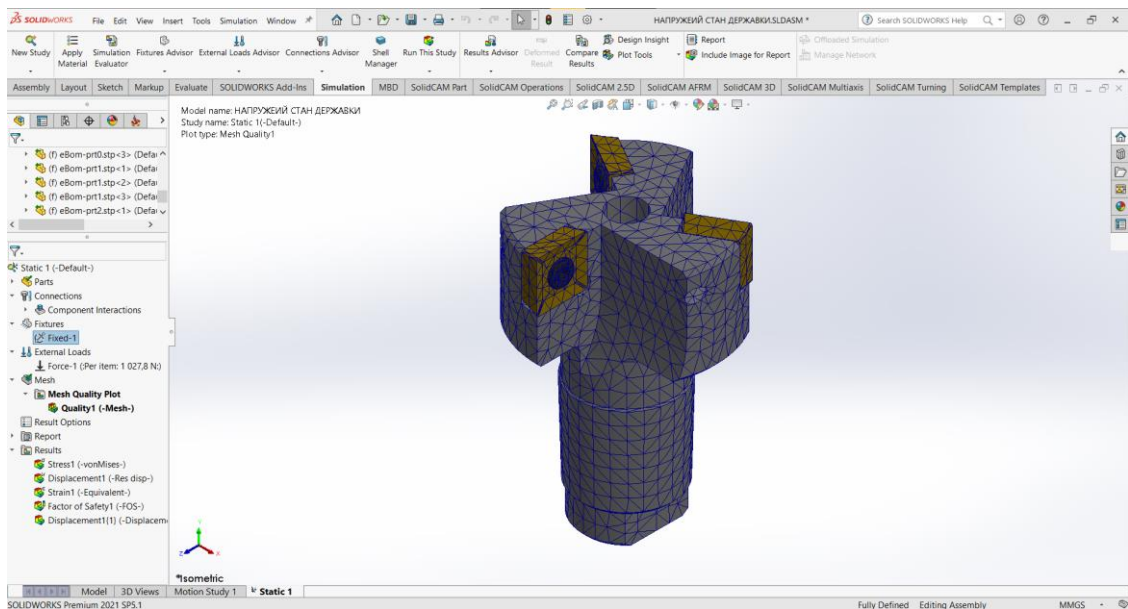


Рисунок 4.1 – Сітка в *Simulation*

Зафіксовано корпус за поверхні лисок:

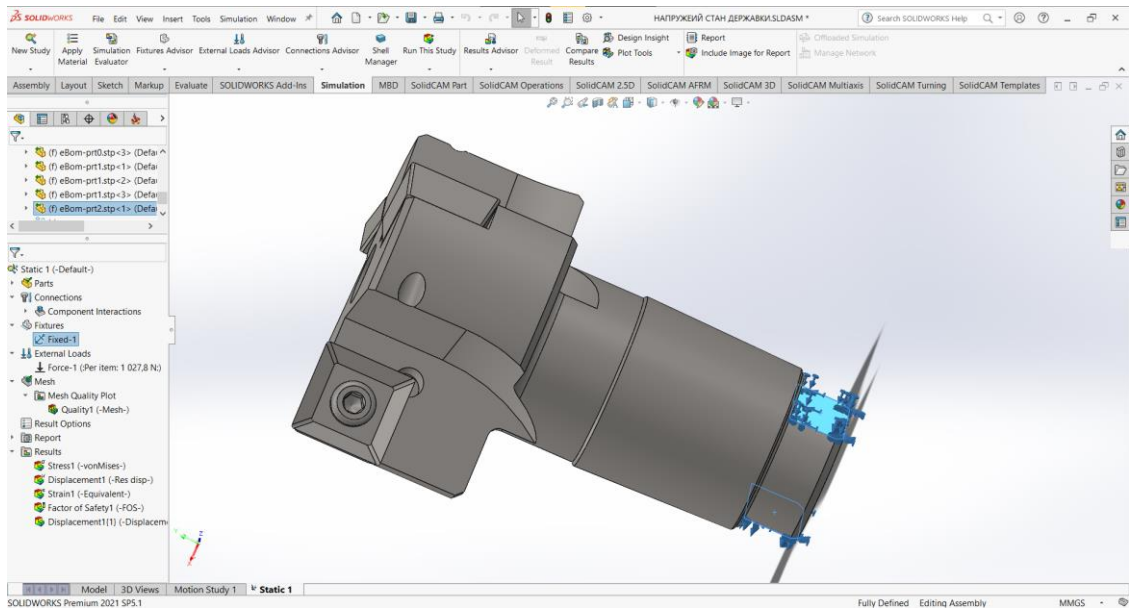


Рисунок 4.2 – Фіксування за лиски

Прикладено розраховану силу різання P_z до змінної пластини:

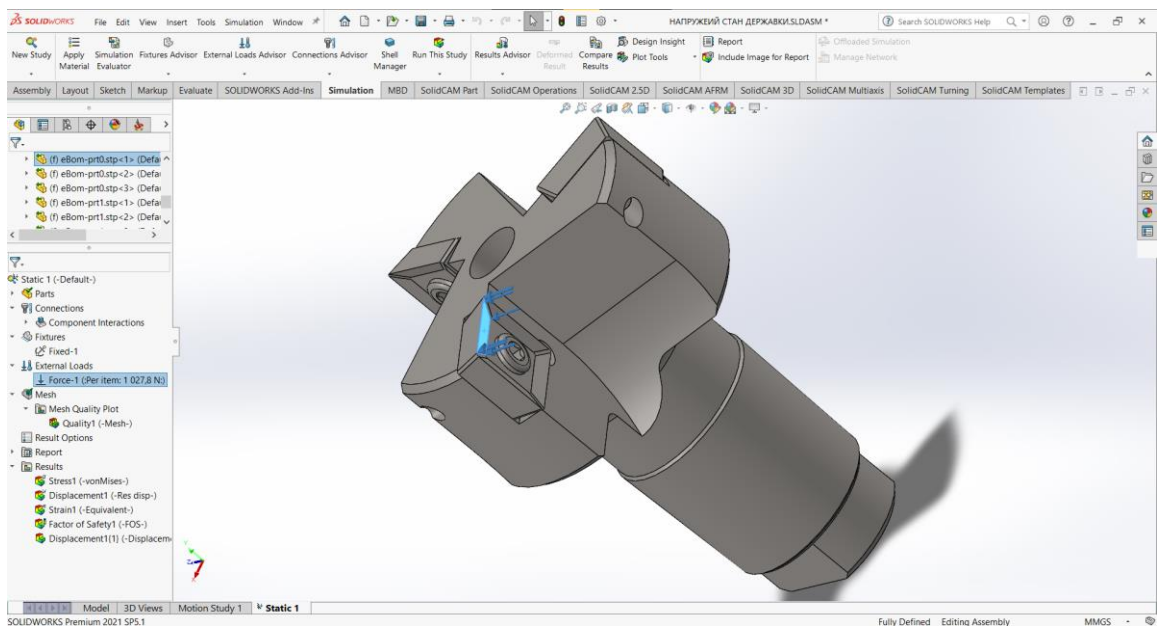


Рисунок 4.3 – Сила різання

Отримано такі результати з напруження складанної одиниці:

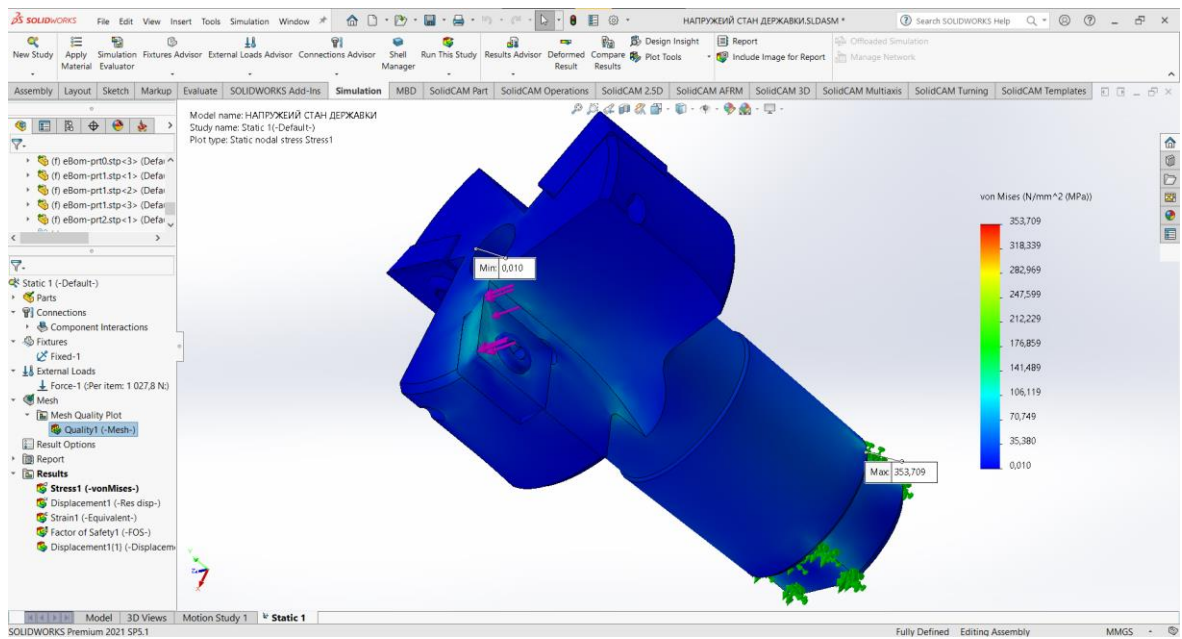


Рисунок 4.4 – Напруження складанної одиниці

Максимальне значення напруження становить 353,8 МПа, а мінімальне – 0,01 МПа.

Отримано такі результати зі зміщення складанної одиниці:

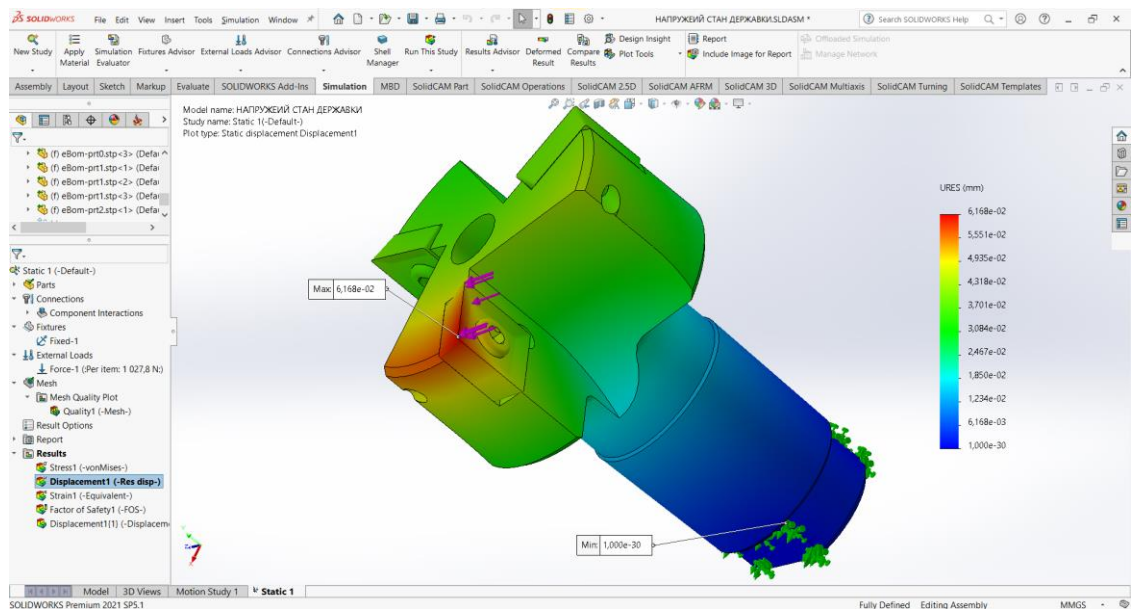


Рисунок 4.5 – Зміщення складанної одиниці

Максимальне значення зміщення становить 0,06 мм, а мінімальне – 0 мм.

Отримано такі результати деформації складанної одиниці:

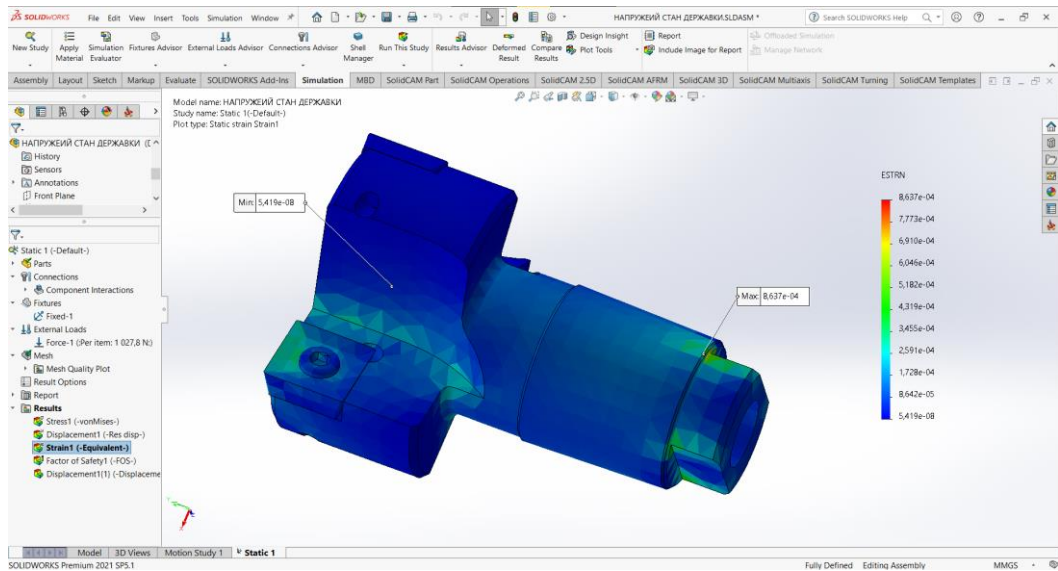


Рисунок 4.6 – Деформація складанної одиниці

Максимальне значення деформації становить $8,6 \cdot 10^{-4}$, а мінімальне – $5,4 \cdot 10^{-8}$.

Отримано такі результати запасу міцності складанної одиниці:

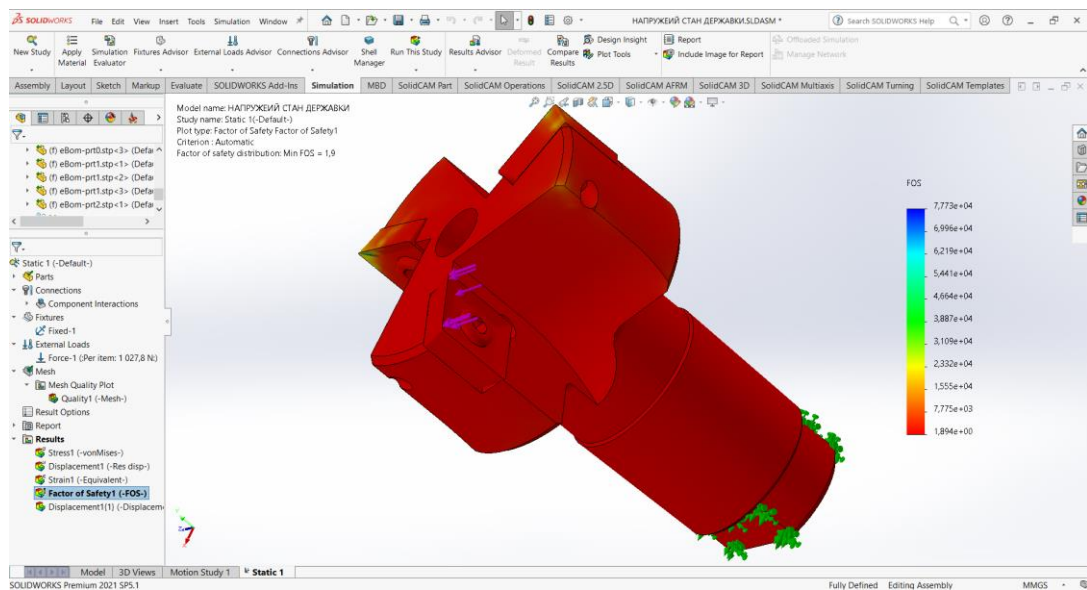


Рисунок 4.7 – Коефіцієнт запасу міцності складанної одиниці

Значення коефіцієнта запасу міцності становить 1,9.

З огляду на отримані результати стверджуємо, що такий корпус циліндричної фрези з такими змінними пластинами підходить для оброблення

чавуну. Режим різання підбрано доречно, матеріали складанної одиниці доречні.

У Додатку Д візуально проілюстровано дослідження навантаженого стану складанної одиниці.

ВИСНОВОК

Під час написання магістерської кваліфікаційної роботи у першому розділі розглянуто торцеві фрези й оцінено технологічність конструкції деталі «Корпус циліндричної фрези».

У другому розділі встановлено виробничу програму випуску деталі, розглянуто ефективний метод лиття за виплавними моделями та спроектовано заготованку за цим методом. Складено технологічну документацію, зокрема маршрут оброблення заготованки. Режими різання увідповіднено зі значеннями швидкості різання, подачі з каталогів передових виробників різального інструмента.

У третьому розділі розглянуто модулі сучасної CAM-програми *SolidCam*. Описано запатентовану технологію *iMachining*, що спрощує встановлення режимів різання. З рештою оброблено заготованку в середовищі *SolidCam* передовими різальними інструментами, що відповідають стандартам *ISO*. Сформовано код виконавчої програми для подальшого реального оброблення на токарно-фрезерному верстаті *Mazak integrex 200-IV ST*.

У четвертому розділі розглянуто популярне доповнення до *SolidWorks* – *Simulation* та його багатогалузеве застосування. Розраховано режим різання для торцевого фрезерування досліджуваною торцевою фрезою зі змінними пластинами, щоб симулювати напружений стан корпусу циліндричної фрези під час оброблення. У результаті симуляція підтвердила доречність розрахованого режиму різання для оброблення сірого чавуну. Жодний складник не зламався, коефіцієнт запасу міцності присутній.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. <https://gmk.center/ua/posts/voienne-pereformatuvannya-metalooobrobka-ta-virobnictvo-metalokonstrukcij/>
2. https://scholar.google.com.ua/scholar?q=%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BA%D0%B0&hl=uk&as_sdt=0%2C5&as_ylo=2022&as_yhi=2023
3. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/480e67a7-5483-43fc-ae93-121a9edb36fd-dc7d35db/relevance/1>
4. Baro P. K., Joshi S. S., Kapoor S. G. Modeling of cutting forces in a face-milling operation with self-propelled round insert milling cutter. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2005. Vol. 45, no. 7-8. P. 831–839. URL:
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.11.008>
5. Прогресивні технології виготовлення деталей насосного обладнання : навчальний посібник / І. М. Дегтярьов, А. О. Нешта, В. О. Колесник. – Суми : Сумський державний університет, 2021. – 256 с.
6. <https://www.indiamart.com/proddetail/face-milling-cutter-11832638997.html>
7. <https://www.zccct-europe.com/en/applications/face-milling/>
8. <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/face-milling>
9. <https://helpnik.college.ks.ua/standart/gost/Catalogue/Index/21/2400.html>
10. Лапковський С., Солдатова М., Трудько І. Відпрацювання конструкції виробу на технологічність - один із найважливіших етапів технологічної підготовки виробництва. Серія Машинобудування №63. Київ, 2011. С. 203–207.
11. ДСТУ 7806:2015. Прокат із легованої конструкційної сталі. Чинний від 2016-04-01. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ».

12. <https://um.co.ua/12/12-3/12-37809.html>
13. <https://www.steel-foundry.com/uk/investment-casting/>
14. ДСТУ 8981-2020. Виливки з металів та сплавів. Допуски розмірів, маси та припуски на механічне оброблення. Чинний від 2021-05-01. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ»
15. <https://www.exapro.com/sp/mazak-integrex200ivstx1500-45916/>
16. <https://www.mazak.com/about-mazak/>
17. <https://www.mazakusa.com/machines/technology/cnc-controls/>
18. <https://www.solidcam.com>
19. Zaleski K., Matuszak J., Zyśko A. Highly Efficient Milling on the Example of Selected Machining Strategies. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2020. Vol. 14, no. 1. P. 167–177. URL: <https://doi.org/10.12913/22998624/116356>.
20. Effect of Optimization Software on Part Shape Accuracy and Production Times during Rough Milling of Aluminum Alloy / P. Ižol et al. *Machines*. 2022. Vol. 10, no. 12. P. 1212. URL: <https://doi.org/10.3390/machines10121212>.
21. Tribological and machining performance of tungsten carbide cutting tool material coated with different carbon nitride films / F. Dumlu et al. *International Journal of Surface Science and Engineering*. 2022. Vol. 16, no. 3. P. 258. URL: <https://doi.org/10.1504/ijsurfse.2022.125450>.
22. Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ / А. Я. Карвацький. – Київ : Київський політехнічний університет ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 392 с.
23. Improving the processability and grain structures of additively manufactured Al-Fe-Cu-xZr alloy: experiment and high-fidelity simulation / J.-Y. Xu et al. *Additive Manufacturing*. 2024. P. 104074. URL: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104074>.
24. Tran H. T., To A. C. Cracking prediction at solid-tooth support interface during laser powder bed fusion additive manufacturing. *Journal of Science:*

Advanced Materials and Devices. 2023. P. 100615. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2023.100615>.

25. Particle deformation and coating deposition behavior in cold spray additive manufactured aluminum deposit on copper substrate by simulation and experiment / X. Yang et al. Journal of Materials Research and Technology. 2024. Vol. 30. P. 2879–2890. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.04.057>.

Перш дворян.

Додат. №

Підп. і дата

Інв. № аркуш.

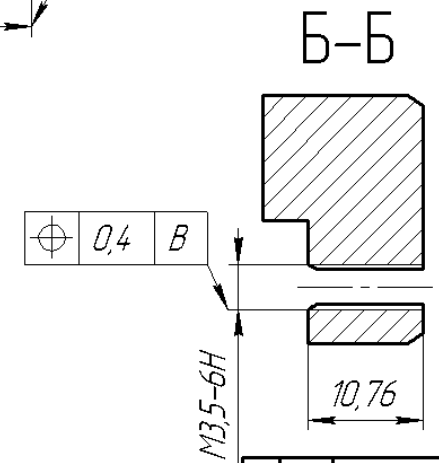
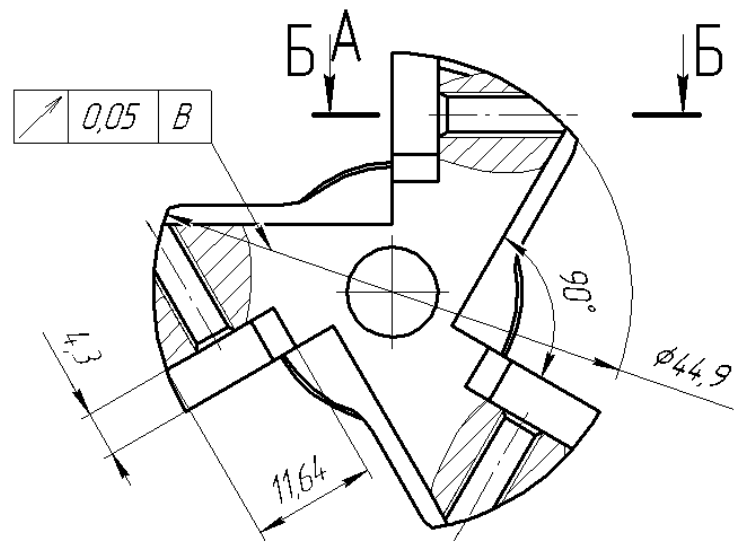
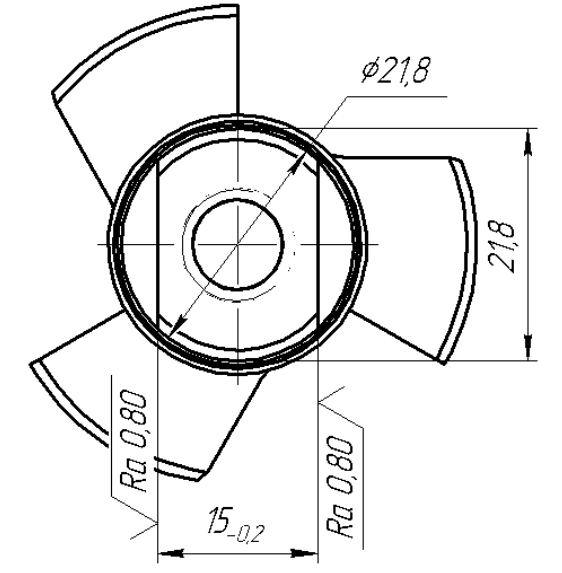
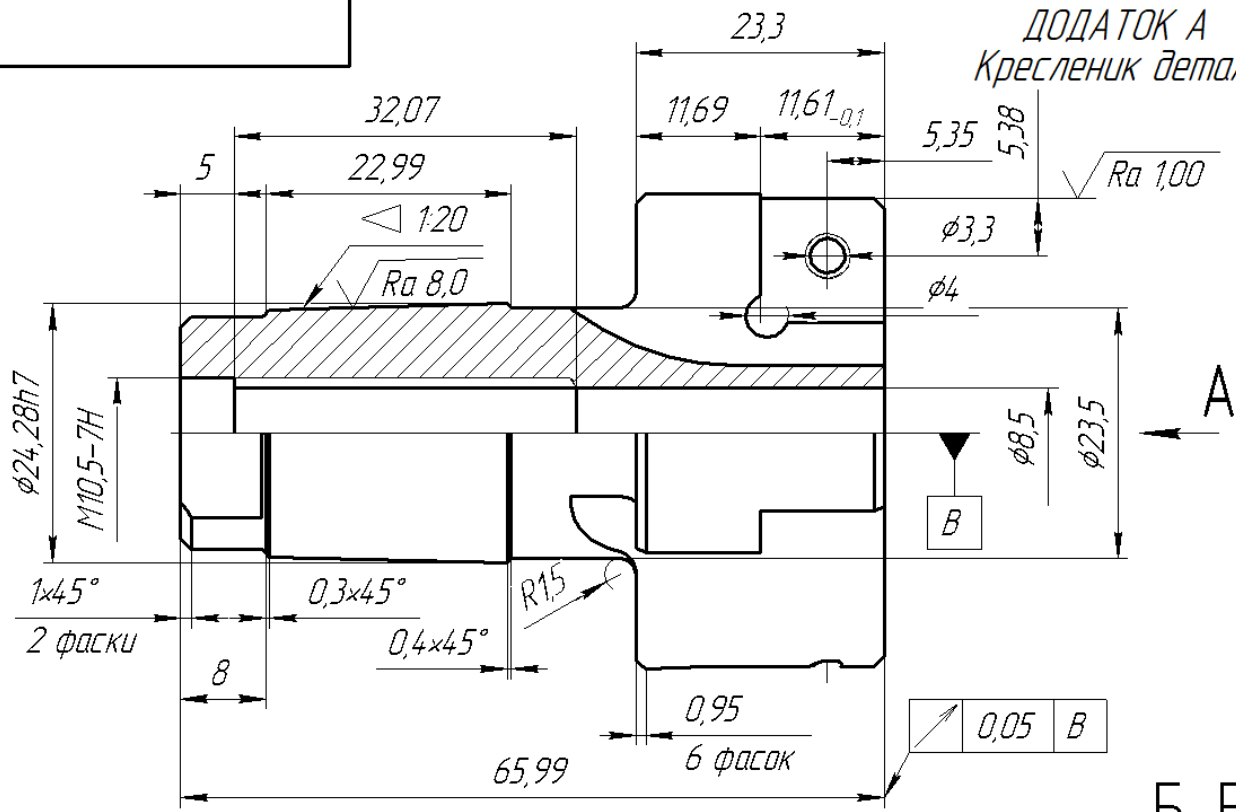
Зам. інв. №

Підп. і дата

Інв. № провідн.

ДОДАТОК А
Кресленик деталі

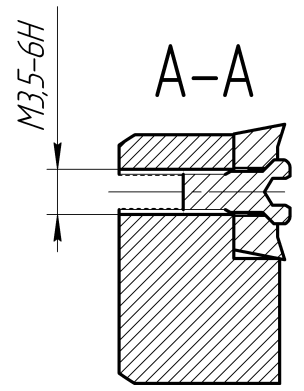
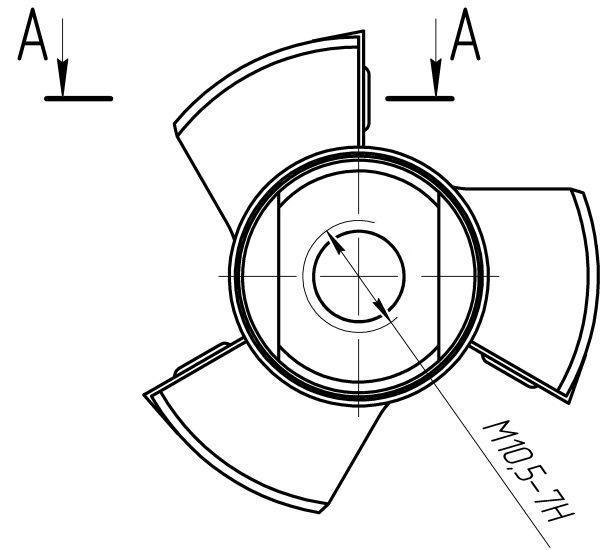
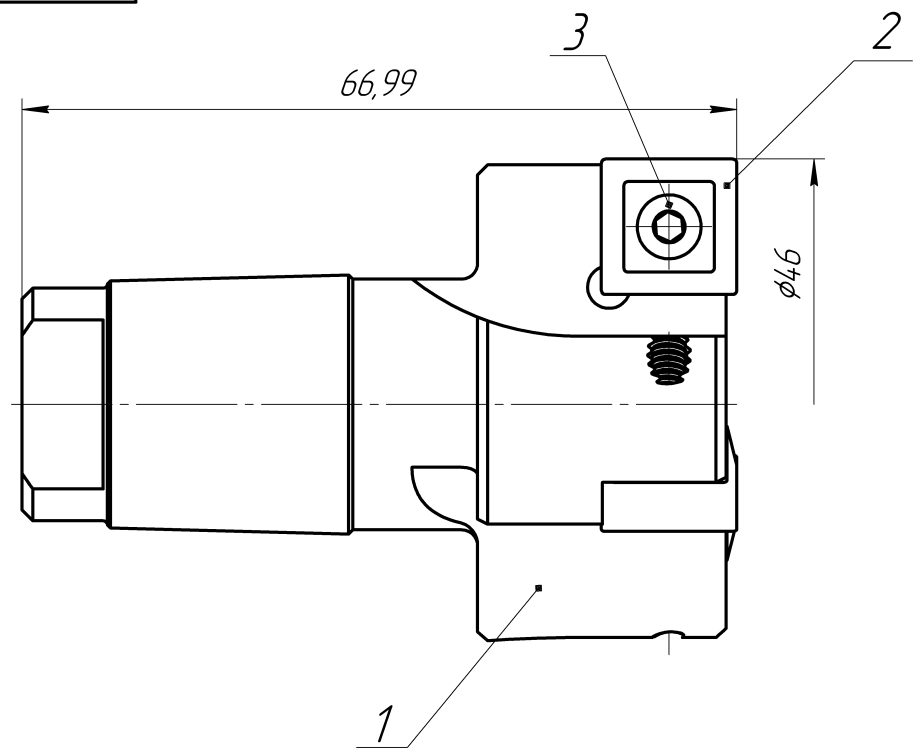
$\sqrt{Ra\ 6,3\ (\sqrt{1})}$



- 1 HRC 46...52
- 2 Неказані розміри радіусів: зовнішніх не більше ніж 0,5 мм, внутрішніх не більше ніж 0,5 мм.
- 3 H14, h14, ± $\frac{IT14}{2}$.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	Корпус циліндричної фрези	Лист	Маса	Масштаб
Розроб.	Зв.Летаренко					0,24	2:1	
Перевір.						Аркуш	Аркушів	
Т.контр.						Сталь 40X ДСТУ 7806:2015	НТУ "ДП" 131М-22Н-1	
Н.контр.						Формат А3		
Затв.					Копія			

Перш. викорис.
 Додат. №
 Підп. і дата
 Інв. № дробл.
 Зам. інв. №
 Підп. і дата
 Інв. № прабін.



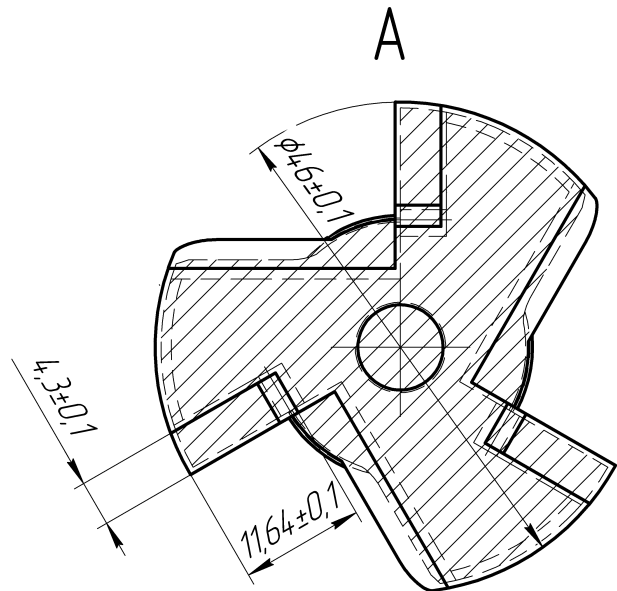
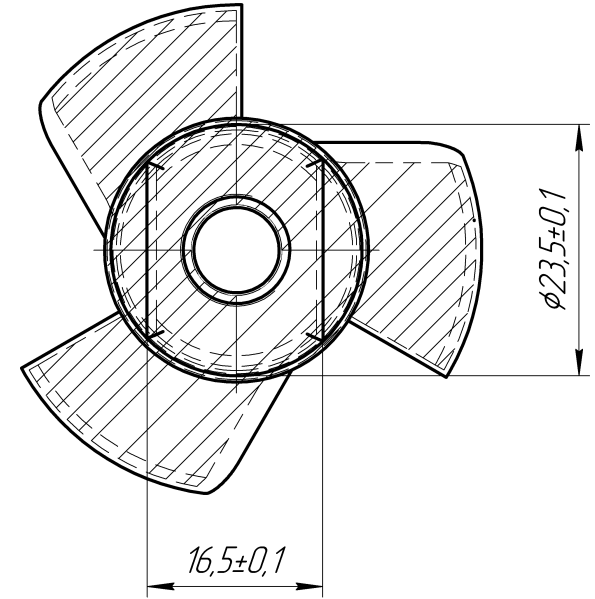
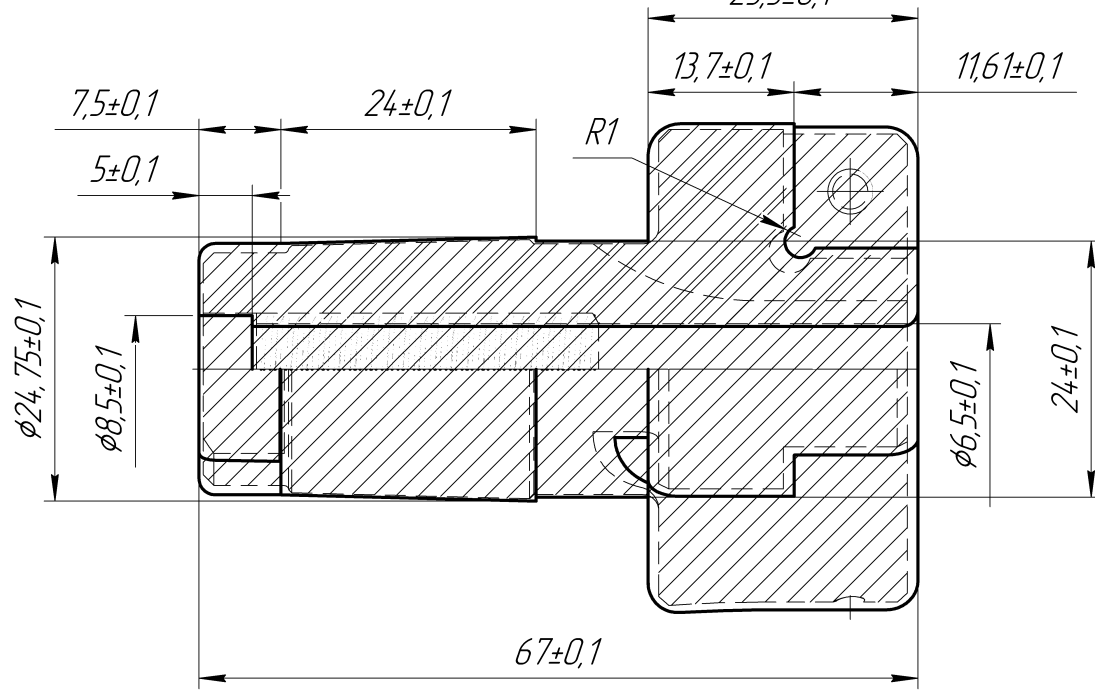
- 1 Торцеве биття до 0,03
- 2 Радіальне биття до 0,03
- 3 Поворот і зміна пластин може здійснюватися без знімання фрези з верстата

Зм.	Арк.	№ док.м.	Підп.	Дата	Торцева фреза зі змінними пластинами	Лит.	Маса	Масштаб
Розроб.	Золотаренко						0,25	2:1
Перевір.						Аркуш	Аркушів	
Т.контр.						НТУ "ДП"		
Н.контр.						131М-22Н-1		
Затв.					Формат А3			

Копював

ДОДАТОК Б
Кресленик заготовки

√ Ra 10,0 (√)



- 1 Точність вилівка 8-5-8-8 ДСТУ 8991:2020.
- 2 Маса 0,24-0,4-0,29 ДСТУ 8991:2020.
- 3 Невказані розміри радіусів: зовнішніх 1,5 мм, внутрішніх 1,5 мм.
- 4 Наявність тріщин та інших ливарних дефектів не допускається.

Зм.	Арк.	№ док.м.	Підп.	Дата	Корпус циліндричної фрези (заготовка)	Лист	Маса	Масштаб
Розроб.	Золотаренко					0,29	2:1	
Перевір.					Аркуш	Аркушів		
Т.контр.					Сталь 40Х ДСТУ 7806:2015		НТУ "ДП"	
Н.контр.							131М-22Н-1	
Затв.							Формат А3	

Копіював

ДОДАТОК В

				23	1
	<i>НТУ «ДП»</i>			02070743. 01140.00005	
Корпус циліндричної фрези					

«Затверджено»

Головний інженер ()

« » _____ 2024 р.

ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ

ПОГОДЖЕНО:

Метрол. контроль _____ ()

Пров. технолог _____ ()

Н. контроль _____ ()

Акт № ____ від «____» _____ 2024 р.

Підпис _____

Гол. фахівець _____ ()

Нач. техбюро _____ ()

Розробник _____ (Золотаренко С.А.)

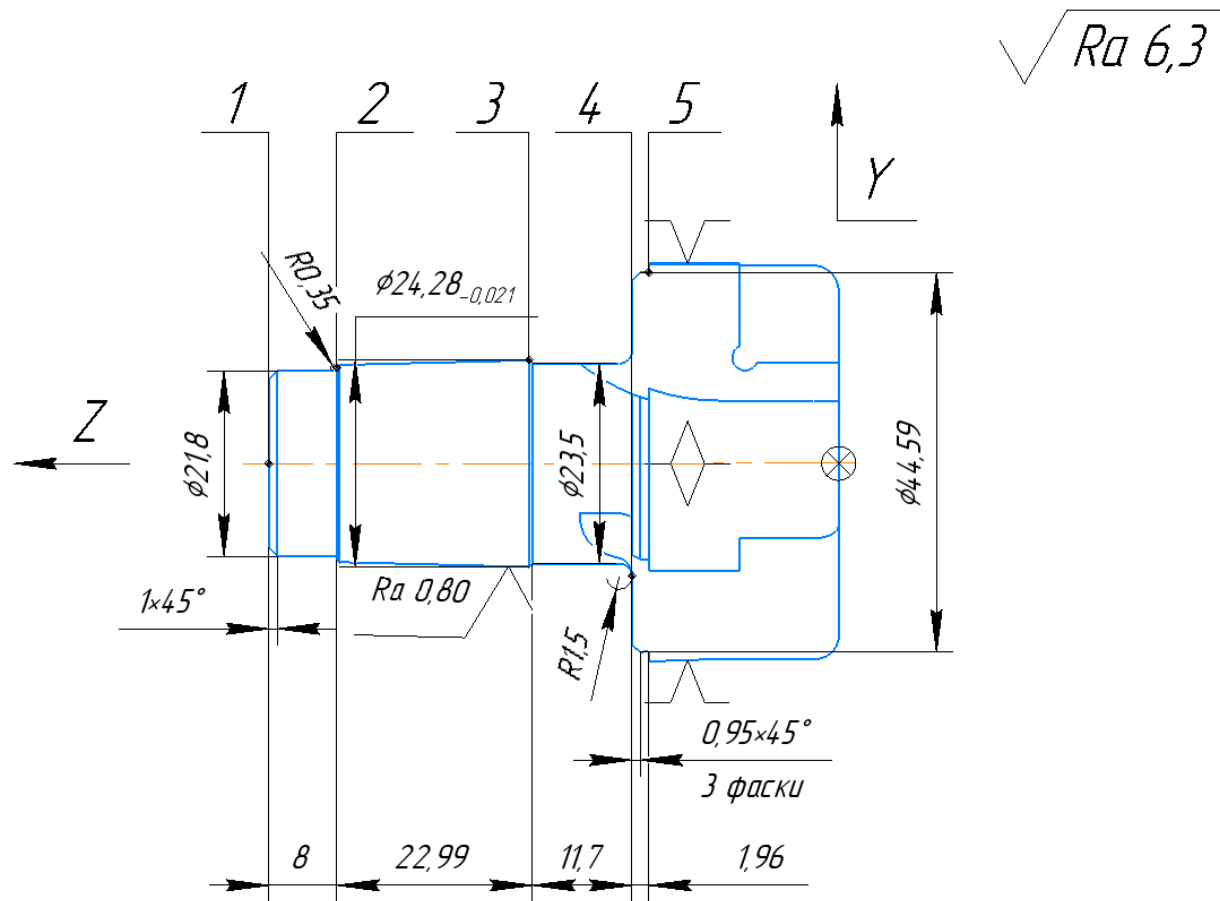
Дубл.																									
Зам.																									
Правд.																									
										Зм.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата	Зм.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата						
										02070743.10140.00001						2	1								
Розроб	Золотаренко																								
Перевірів	Дербаба																								
										HTU «ДП»															
										Корпус циліндричної фрези															
Н. контр.																									
Наймення операції				Матеріал				Твердість		ОВ	МД	Профіль і розміри				МЗ	КОІД								
Токарно-фрезерна з ЧПК				40Х				HRC 46-52		кг	0,24	Ø47x68				0,29	1								
Обладнання, система ЧПК				Позначка програми				То	Тв	Тпз	Тшт	ЗОР													
Mazak integrex 200-IV ST												Емульсія													
Р						П		D або B, мм		L, мм	t, мм	i	S, мм/об		п, об/хв	V, м/хв									
040	13. Нарізати нарізь пов.12,13,14																								
T41	Мітчик Hoffman: Garant 20 2515																								
42	(t = 0,5 мм, S = 0,03 мм/об, Vm = 8 м/хв);																								
43																									
044	14. Фрезерувати пов.15																								
T45	Горцева фреза Hoffman: Garant 21 3058																								
46	(t = 0,5 мм, S = 0,4 мм/об, Vm = 37 м/хв);																								
047	15. Фрезерувати пов.16,17,18																								
T48	Фреза Hoffman: Garant 12 2793																								
49	(t = 0,5 мм, S = 0,03 мм/об, Vm = 50 м/хв);																								
050	16. Зенкерувати фаску пов.16,17,18																								
T51	Зенкер Hoffman: Garant 20 3020																								
52	(t = 0,5 мм, S = 0,2 мм/об, Vm = 15 м/хв);																								

Дубл.																									
Зам.																									
Правд.																									
											Зм.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата	Зм.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата					
											02070743.10140.00001					2	1								
Розроб	Золотаренко															02070743.									
Перевірив	Дербаба															60140.00002									
											Корпус циліндричної фрези														025
Наймення операції				Матеріал				Твердість		ОВ	МД	Профіль і розміри				МЗ	КОІД								
Токарно-фрезерна з ЧПК				40X				HRC 46-52		кг	0,24	Ø47x68				0,29	1								
Обладнання, система ЧПК				Познака програми				То	Тв	Тпз	Тшт	ЗОР													
Mazak integrex 200-IV ST												Емульсія													
Р					П	D або B, мм		L, мм		t, мм	i	S, мм/об		п, об/хв	V, м/хв										
053	17. Свердлити отвір пов.15																								
Т54	Свердло Hoffman: Garant 12 2440																								
55	(t = 0,5 мм, S = 0,15 мм/об, Vm = 35 м/хв);																								
056	18. Контролювати розміри Ø24,28 ^{-0,021} ; 11,61 ^{-0,1} ; 15 ^{-0,2}																								
Т57	Стіл БКТ; Мікрометр Hortig 42 0542-50-75																								
58																									
059																									
Т60																									
61																									
062																									
Т63																									
64																									
065																									

Дубл.			
Зам.			
Правд.			

Зм.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата	Зм.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата
							02070743.60140.00003	1	1

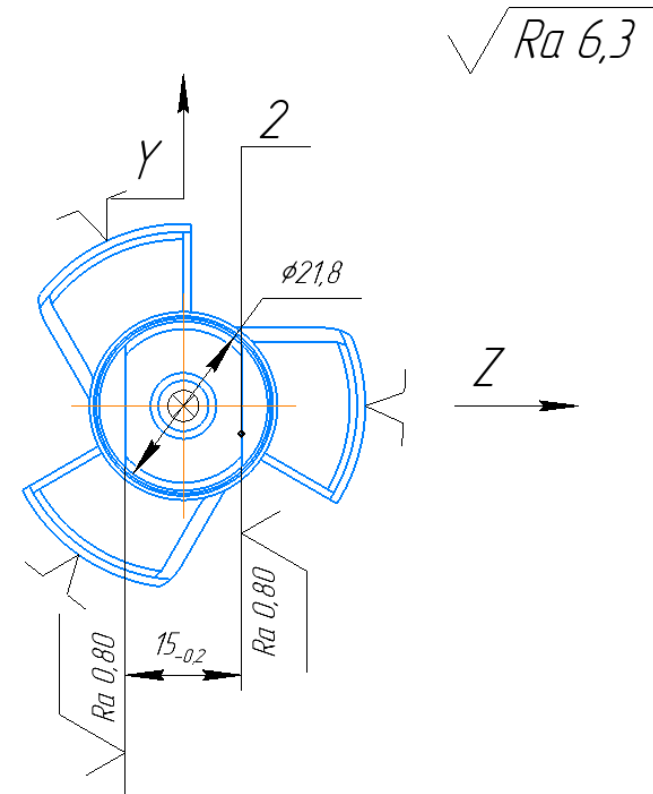
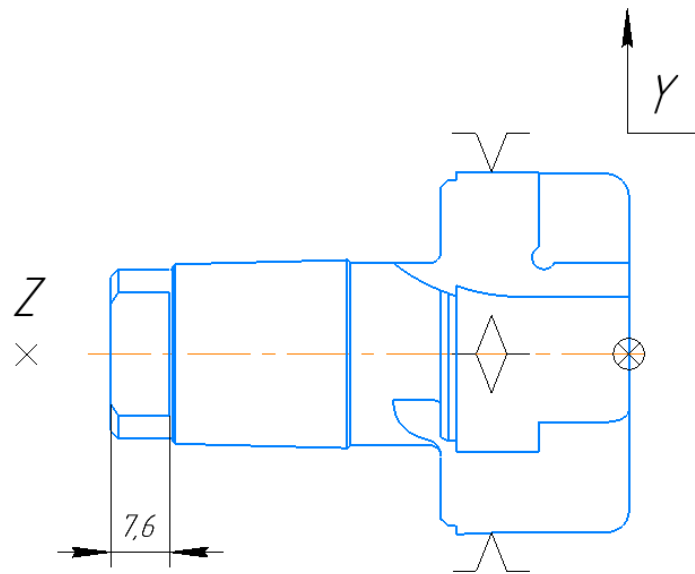
Розроб	Золотаренко			НТУ «ДП»				02070743.20140.00004			
Перевірив	Дербаба										
Н. контр.				Корпус циліндричної фрези				1	5	7	05



Дубл.			
Зам.			
Правд.			

Зм.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата	Зм.	Арку	№ Докум.	Підпис	Дата	
							02070743.60140.00003		1	1

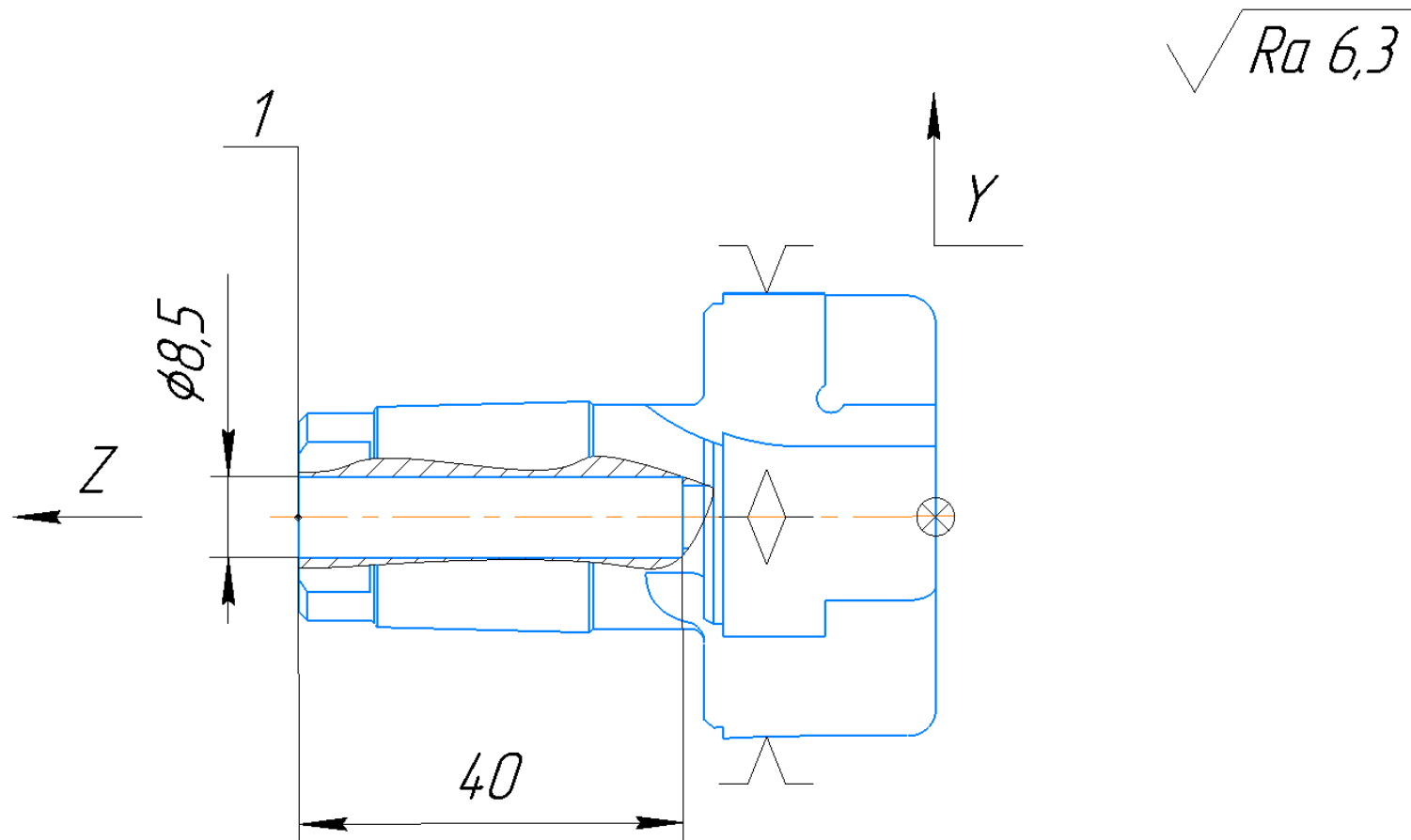
Розроб	Золотаренко			НТУ «ДП»			02070743.20140.00004				
Перевірив	Дербаба										
Н. контр.				Корпус циліндричної фрези				1	5	7	05



Дубл.			
Зам.			
Правд.			

Зм.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата	Зм.	Арку	№ Докум.	Підпис	Дата
							02070743.60140.00003	1	1

Розроб	Золотаренко			НТУ «ДП»				02070743.20140.00004			
Перевірив	Дербаба										
Н. контр.				Корпус циліндричної фрези				1	5	7	05



Дубл.			
Зам.			
Правд.			

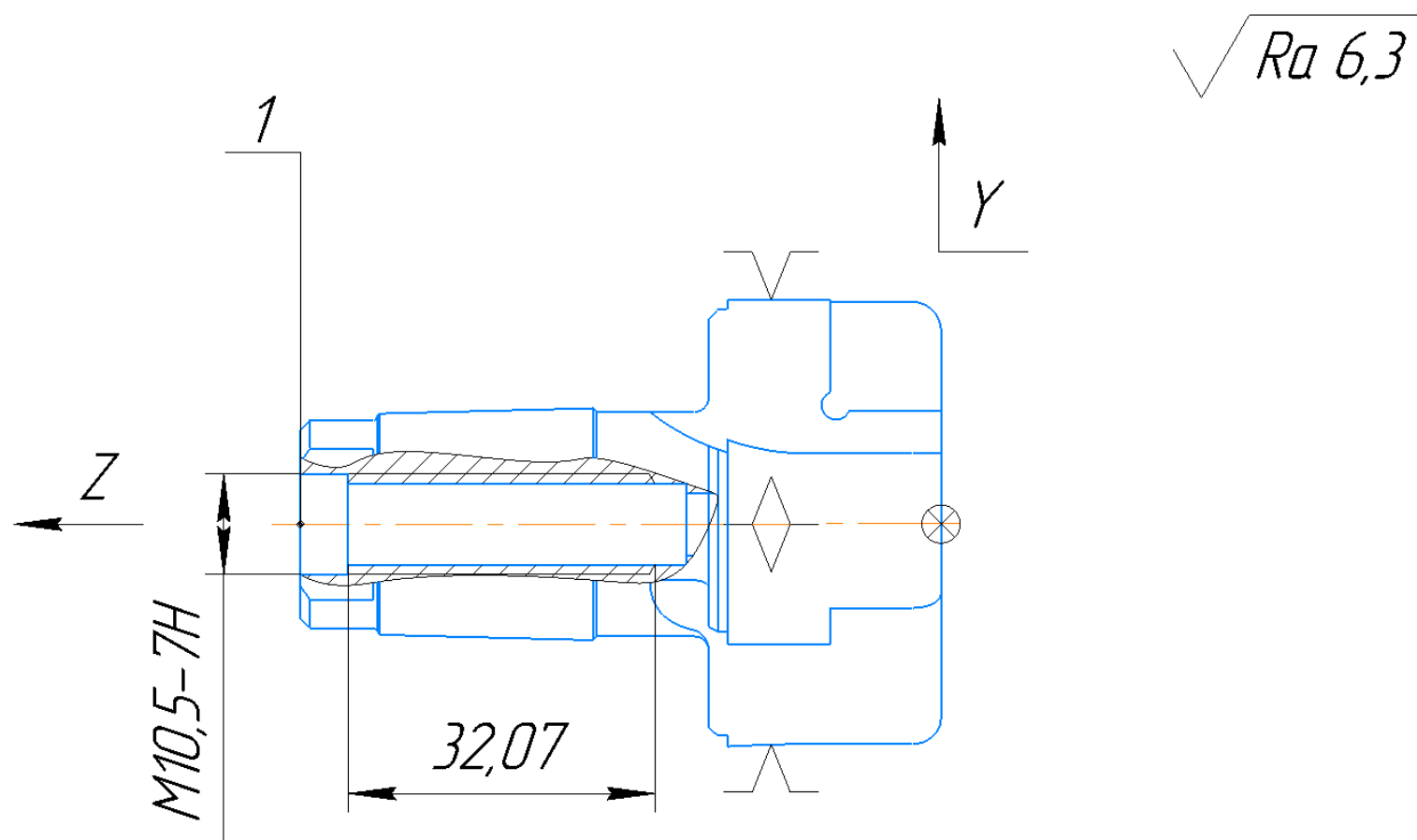
Зм.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата	Зм.	Арку	№ Докум.	Підпис	Дата
-----	-------	----------	--------	------	-----	------	----------	--------	------

02070743.60140.00003

1

1

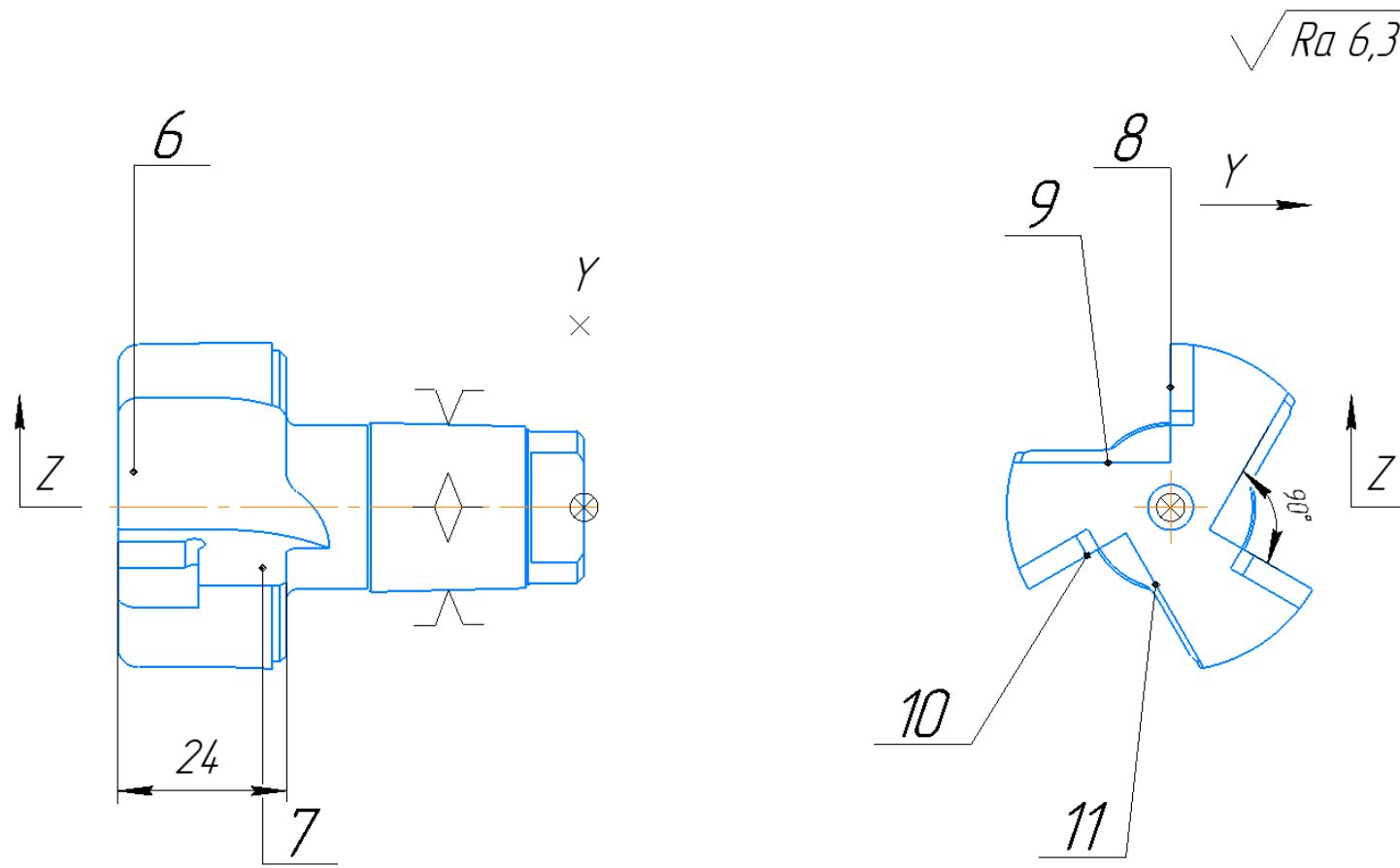
Розроб	Золотаренко			НТУ «ДП»				02070743.20140.00004			
Перевірив	Дербаба										
Н. контр.				Корпус циліндричної фрези				1	5	7	05



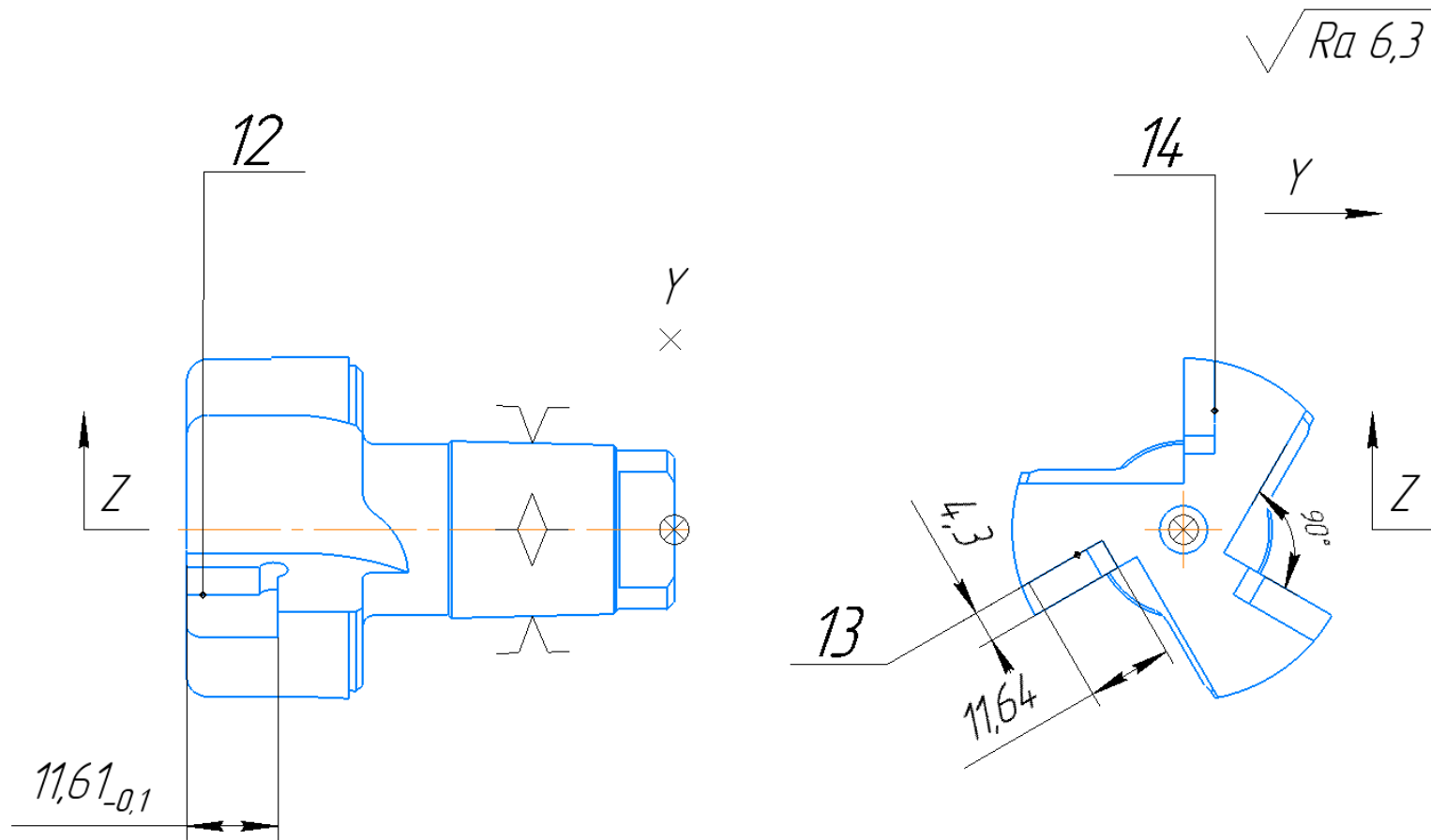
Дубл.			
Зам.			
Правд.			

Зм.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата	Зм.	Арку	№ Докум.	Підпис	Дата	
							02070743.60140.00003		1	1

Розроб	Золотаренко			НТУ «ДП»			02070743.20140.00004							
Перевірив	Дербаба													
Н. контр.				Корпус циліндричної фрези							1	5	7	05



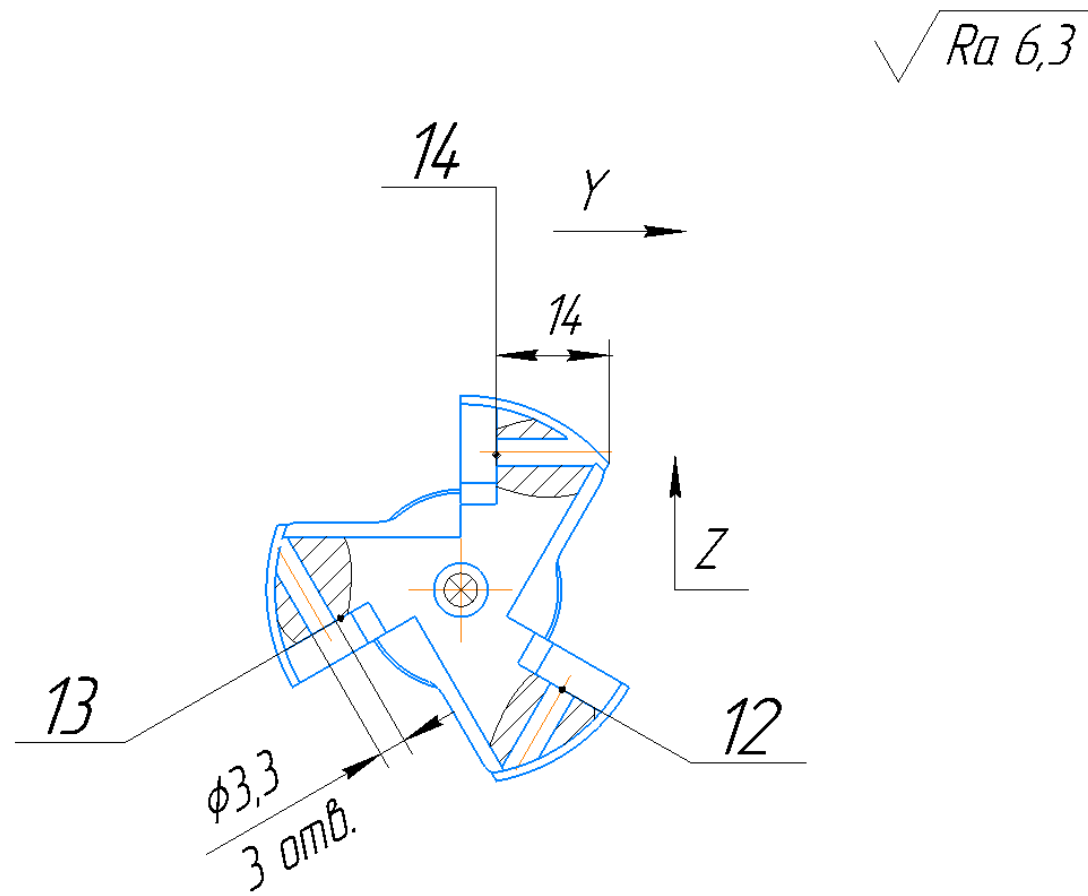
Дубл.													
Зам.													
Правд.													
						Зм.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата			
						02070743.60140.00003			1	1			
Розроб	Золотаренко					НТУ «ДП»				02070743.20140.00004			
Перевірив	Дербаба												
						Корпус циліндричної фрези				1	5	7	05
Н. контр.													



Дубл.			
Зам.			
Правд.			

Зм.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата	Зм.	Арку	№ Докум.	Підпис	Дата
							02070743.60140.00003	1	1

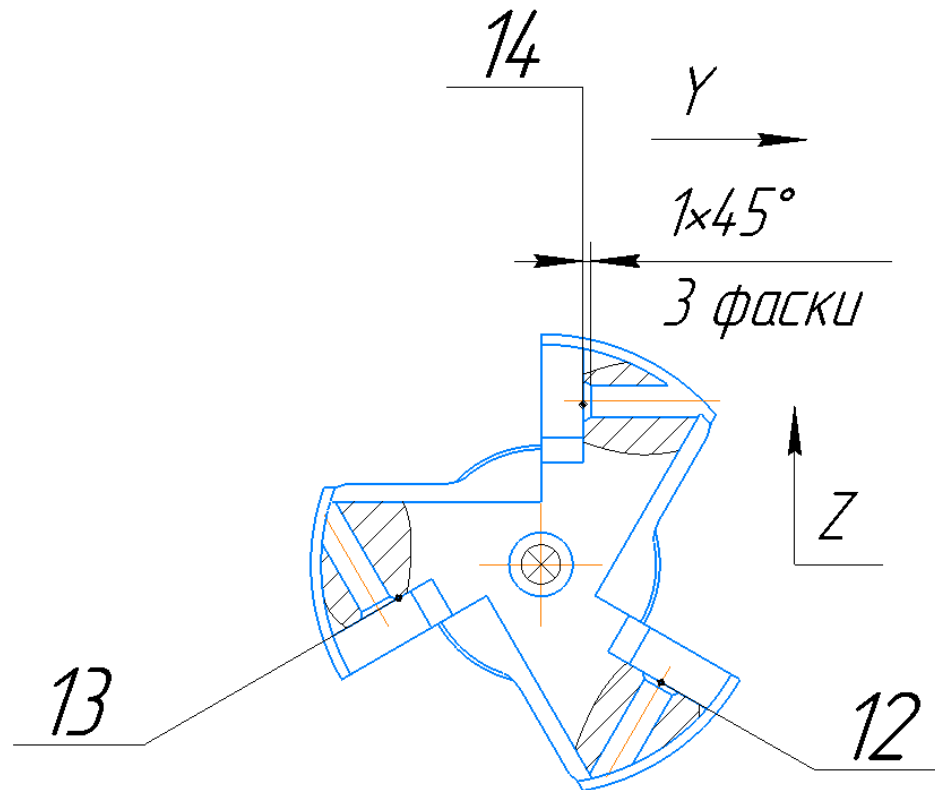
Розроб	Золотаренко			НТУ «ДП»			02070743.20140.00004				
Перевірив	Дербаба										
Н. контр.				Корпус циліндричної фрези				1	5	7	05



Дубл.			
Зам.			
Правд.			

Зм.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата	Зм.	Арку	№ Докум.	Підпис	Дата	
							02070743.60140.00003		1	1

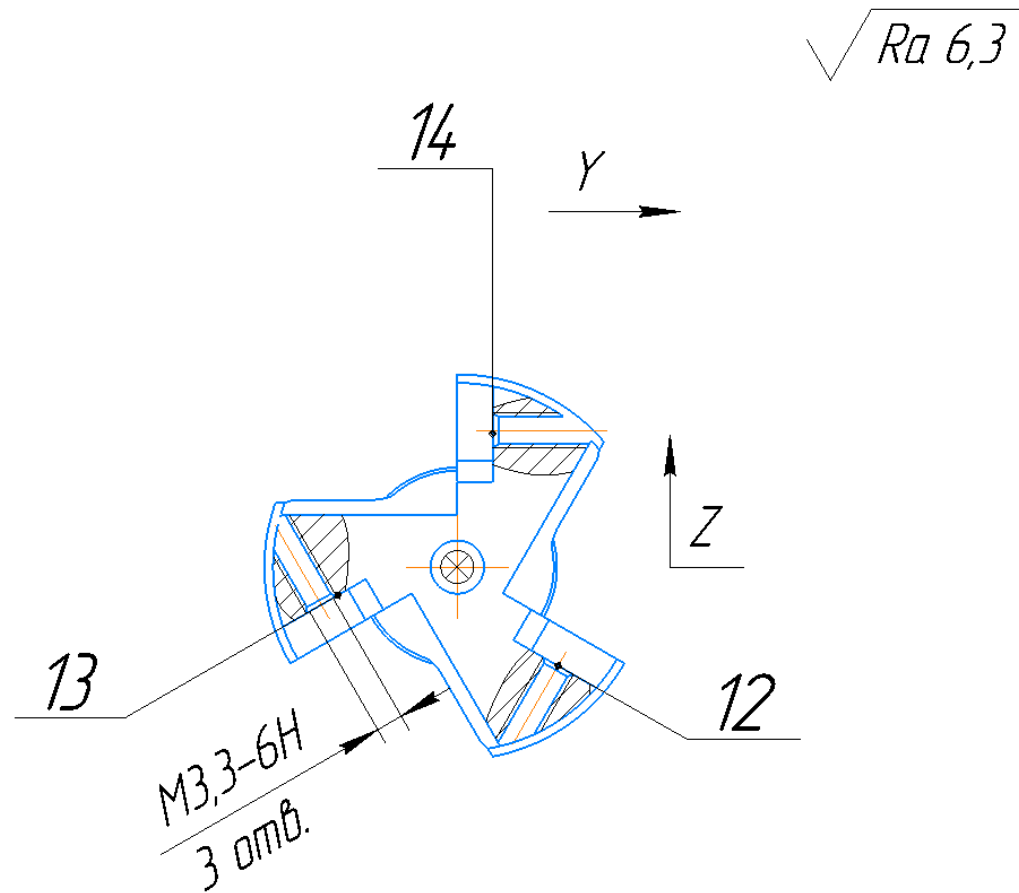
Розроб	Золотаренко			НТУ «ДП»				02070743.20140.00004			
Перевірив	Дербаба										
Н. контр.				Корпус циліндричної фрези				1	5	7	05

 $\sqrt{Ra\ 6,3}$


Дубл.			
Зам.			
Правд.			

Зм.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата	Зм.	Арку	№ Докум.	Підпис	Дата
							02070743.60140.00003	1	1

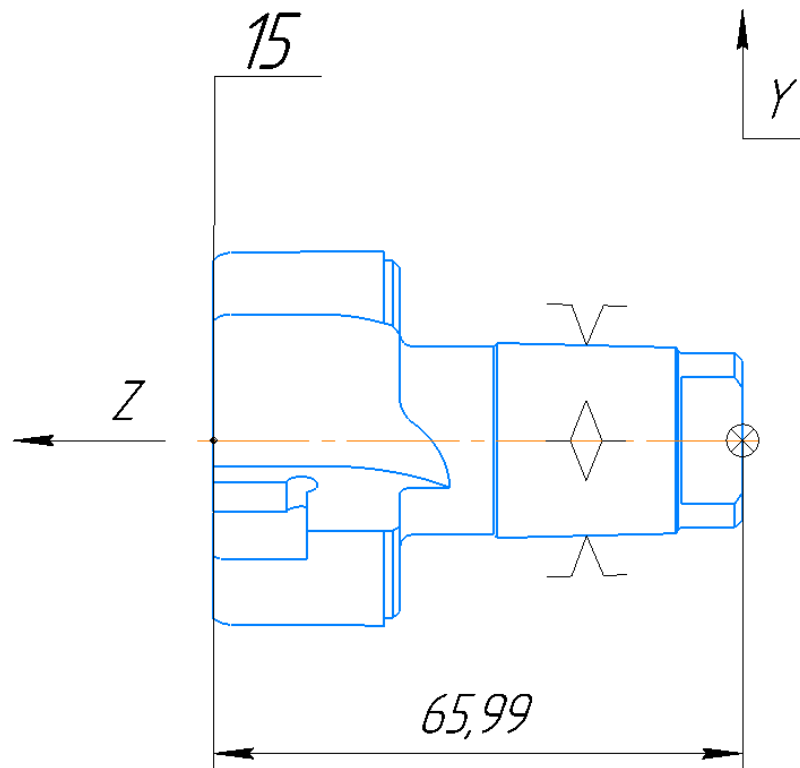
Розроб	Золотаренко			НТУ «ДП»			02070743.20140.00004				
Перевірив	Дербаба										
Н. контр.				Корпус циліндричної фрези				1	5	7	05



Дубл.			
Зам.			
Правд.			

Зм.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата	Зм.	Арку	№ Докум.	Підпис	Дата
							02070743.60140.00003	1	1

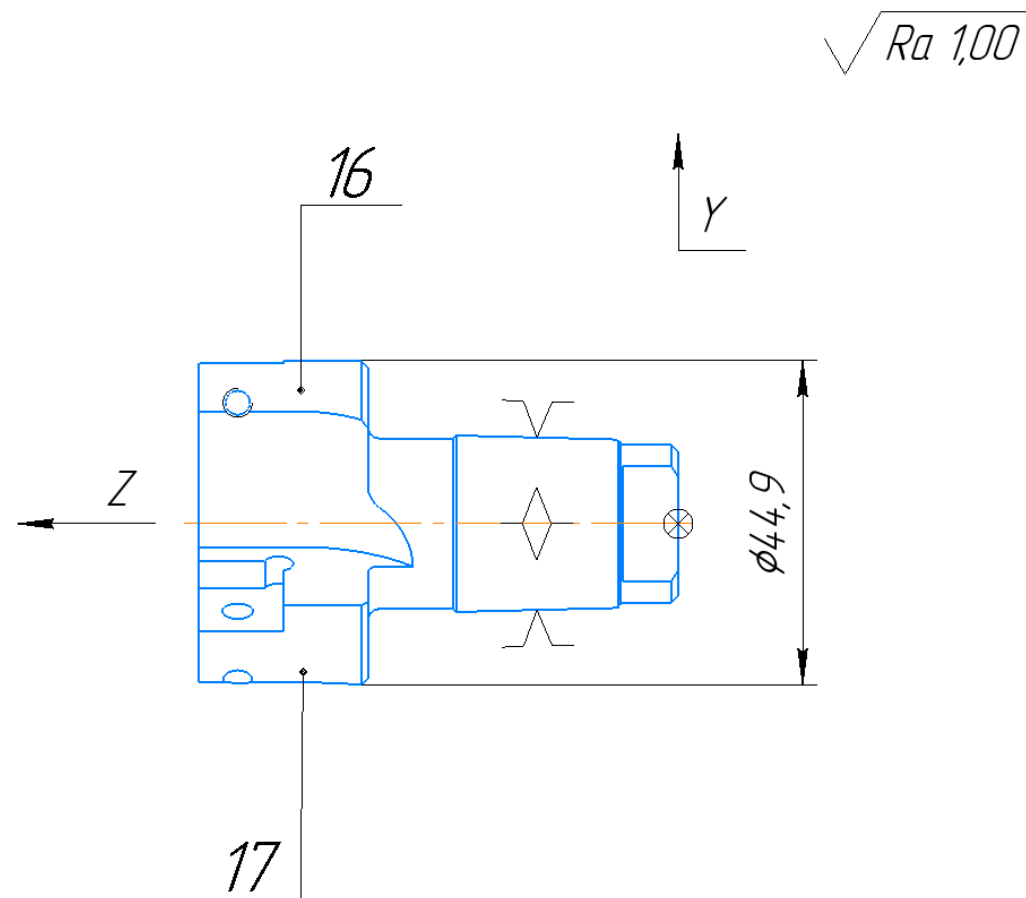
Розроб	Золотаренко			НТУ «ДП»				02070743.20140.00004			
Перевірив	Дербаба										
				Корпус циліндричної фрези				1	5	7	05
Н. контр.											

 $\sqrt{Ra\ 6,3}$


Дубл.			
Зам.			
Правд.			

Зм.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата	Зм.	Арку	№ Докум.	Підпис	Дата
							02070743.60140.00003	1	1

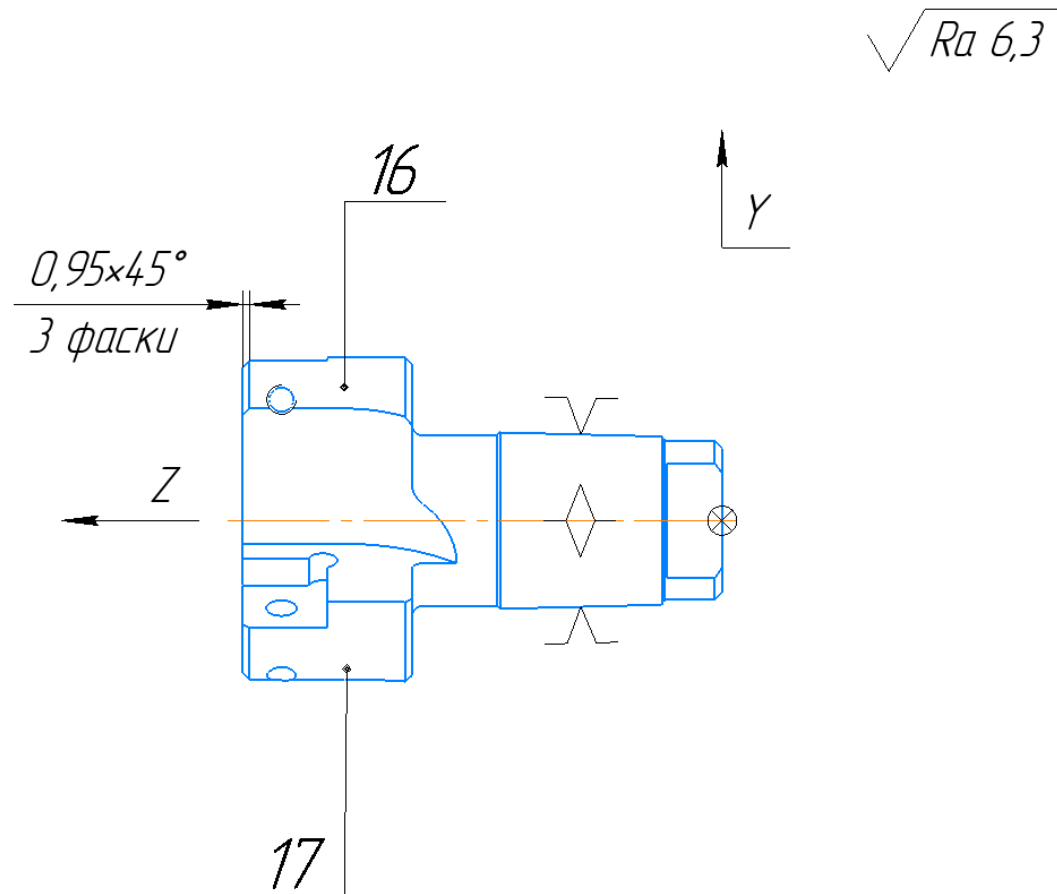
Розроб	Золотаренко			НТУ «ДП»				02070743.20140.00004			
Перевірив	Дербаба										
Н. контр.				Корпус циліндричної фрези				1	5	7	05



Дубл.			
Зам.			
Правд.			

Зм.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата	Зм.	Арку	№ Докум.	Підпис	Дата
							02070743.60140.00003	1	1

Розроб	Золотаренко			НТУ «ДП»			02070743.20140.00004				
Перевірив	Дербаба										
Н. контр.				Корпус циліндричної фрези				1	5	7	05



Дубл.			
Зам.			
Правд.			

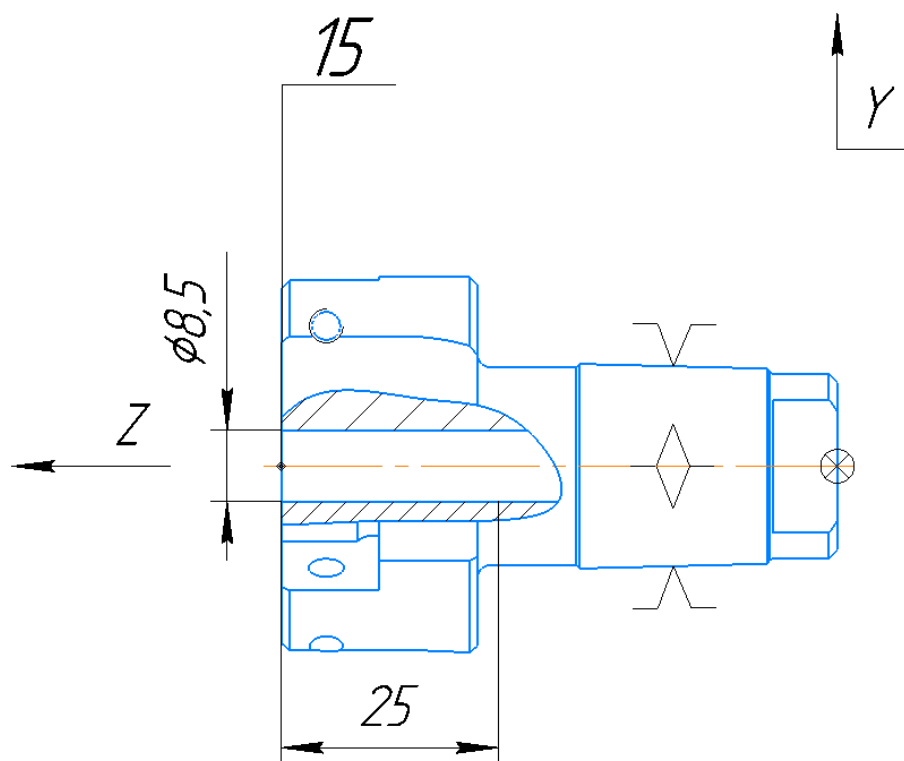
Зм.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата	Зм.	Аркуш	№ Докум.	Підпис	Дата
-----	-------	----------	--------	------	-----	-------	----------	--------	------

02070743.60140.00003

1

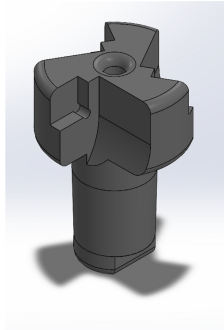
1

Розроб	Золотаренко			НТУ «ДП»				02070743.20140.00004			
Перевірив	Дербаба										
Н. контр.				Корпус циліндричної фрези				1	5	7	05

 $\sqrt{Ra\ 6,3}$ 

ДОДАТОК Г

Програмна реалізація оброблення в *SolidCAM*



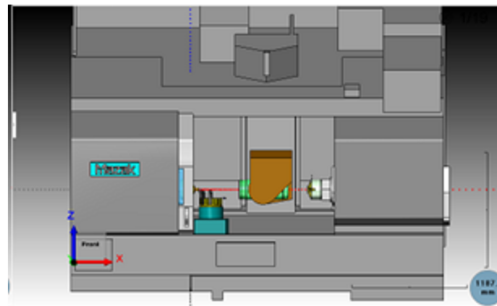
3D модель заготовки



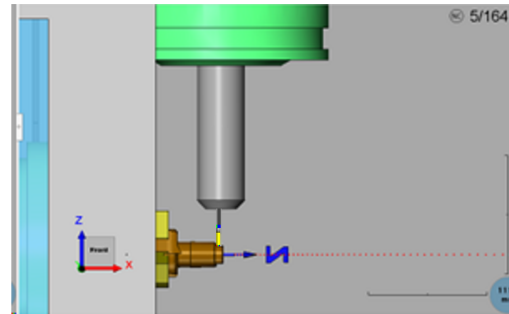
Верстат *MAZAK INTEGREX 200-IV ST*



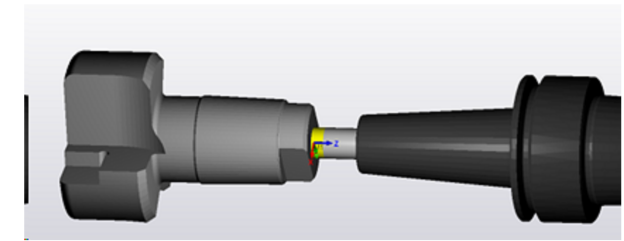
Робоча зона верстата



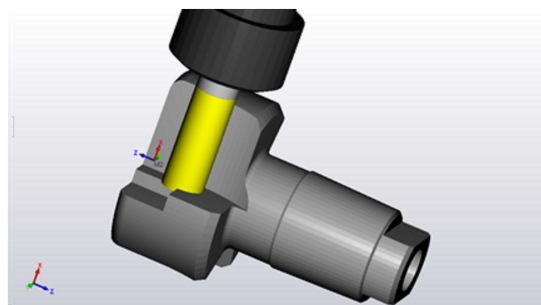
Вигляд верстата в машинній симуляції



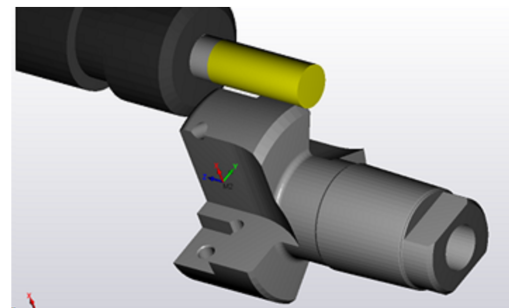
Фрезерування лисок



Свердління осьового отвору



Фрезерування зубів



Фрезерування зубів

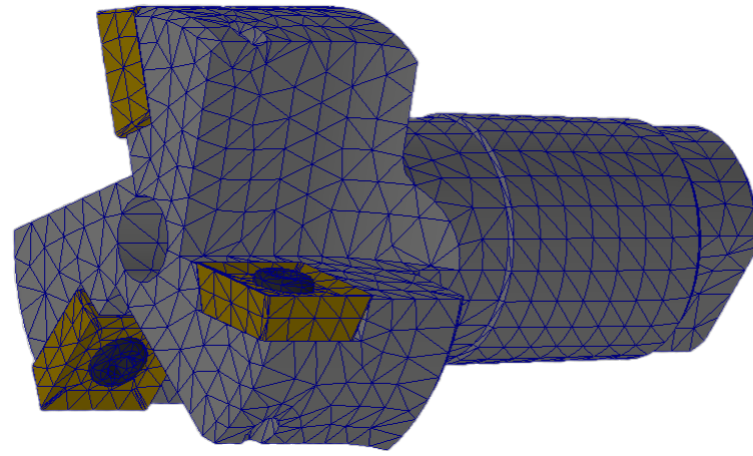
```

M1 ( 2-ARY-20X4)
M2 (24.00-22)
M3 (MACHINE-CONTROL-POS FOR SPINDLE 3=++)
M4 (G00 S1)
M5 (G00 S1)
M6 (M10)
M7 (M10)
M8 (M10)
M9 (M10)
M10 (M10)
M11 (M10)
M12 (M10)
M13 (M10)
M14 (M10)
M15 (M10)
M16 (M10)
M17 (M10)
M18 (M10)
M19 (M10)
M20 (M10)
M21 (M10)
M22 (M10)
M23 (M10)
M24 (M10)
M25 (M10)
M26 (M10)
M27 (M10)
M28 (M10)
M29 (M10)
M30 (M10)
M31 (M10)
M32 (M10)
M33 (M10)
M34 (M10)
M35 (M10)
M36 (M10)
M37 (M10)
M38 (M10)
M39 (M10)
M40 (M10)
M41 (M10)
M42 (M10)
M43 (M10)
M44 (M10)
M45 (M10)
M46 (M10)
M47 (M10)
M48 (M10)
M49 (M10)
M50 (M10)
M51 (M10)
M52 (M10)
M53 (M10)
M54 (M10)
M55 (M10)
M56 (M10)
M57 (M10)
M58 (M10)
M59 (M10)
M60 (M10)
M61 (M10)
M62 (M10)
M63 (M10)
M64 (M10)
M65 (M10)
M66 (M10)
M67 (M10)
M68 (M10)
M69 (M10)
M70 (M10)
M71 (M10)
M72 (M10)
M73 (M10)
M74 (M10)
M75 (M10)
M76 (M10)
M77 (M10)
M78 (M10)
M79 (M10)
M80 (M10)
M81 (M10)
M82 (M10)
M83 (M10)
M84 (M10)
M85 (M10)
M86 (M10)
M87 (M10)
M88 (M10)
M89 (M10)
M90 (M10)
M91 (M10)
M92 (M10)
M93 (M10)
M94 (M10)
M95 (M10)
M96 (M10)
M97 (M10)
M98 (M10)
M99 (M10)
M100 (M10)

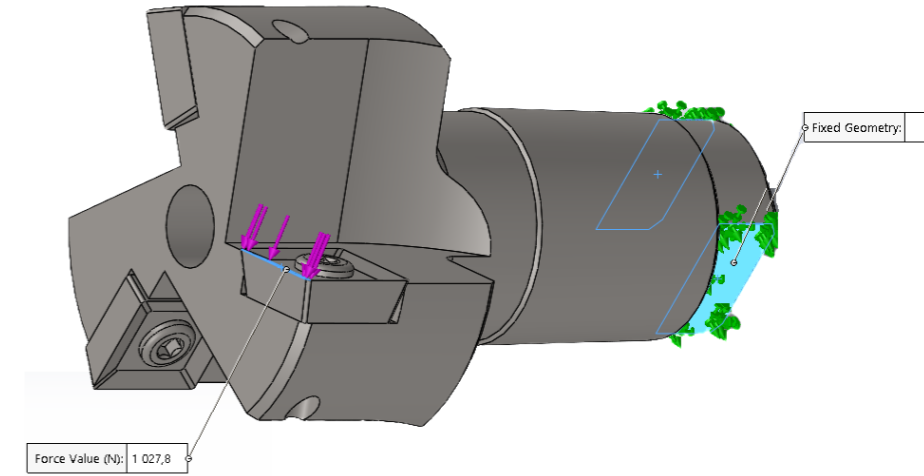
```

Код виконавчої програми для двох установлень

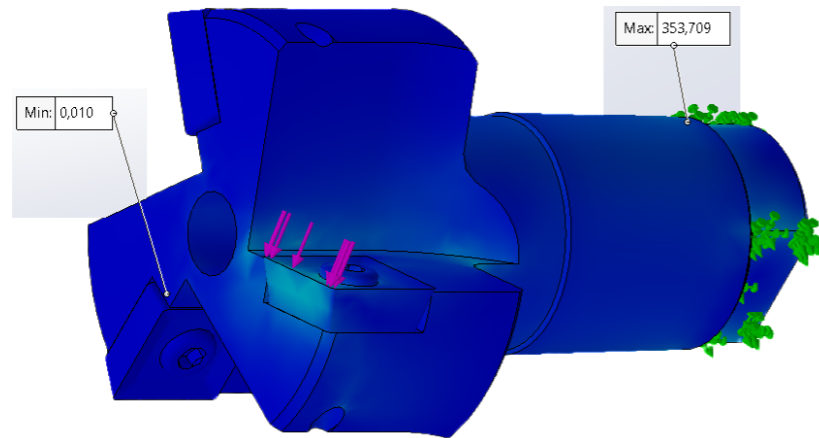
ДОДАТОК Д
Дослідження навантаженого стану в *Simulation*



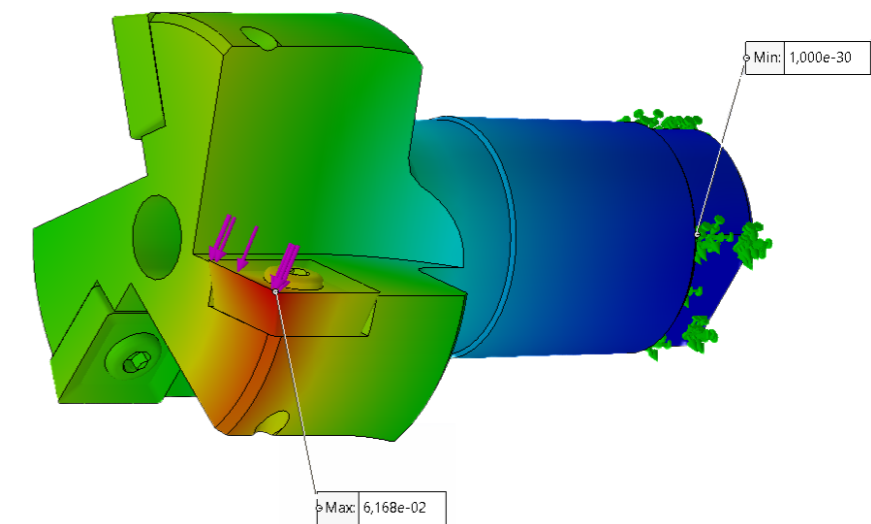
Сітка



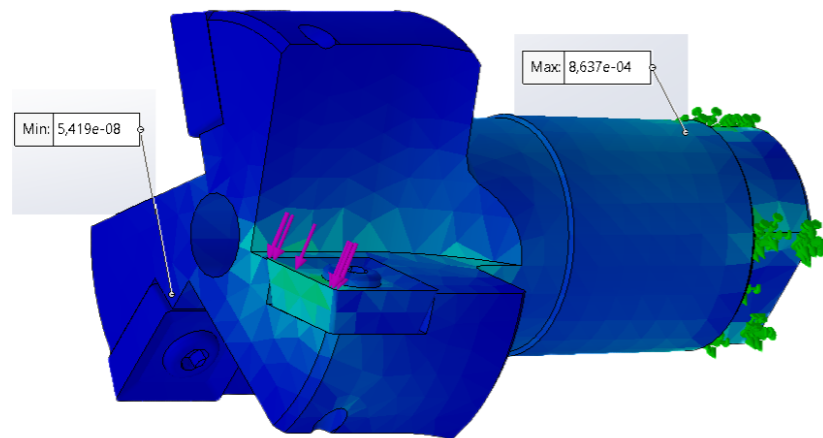
Прикладена сила різання $F_z = 1027,8$ Н
та фіксування за лиски



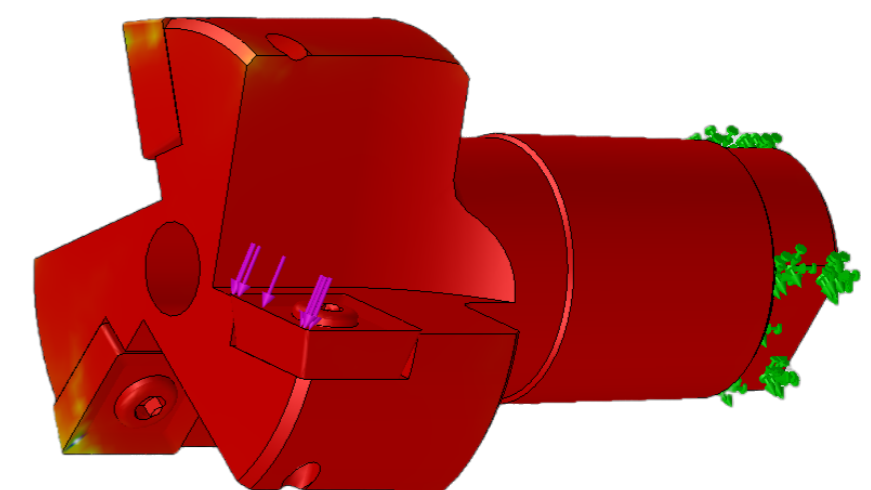
Епюра навантаження.
Максимальне значення 353,8 МПа, мінімальне – 0,01 МПа



Епюра зміщення.
Максимальне значення 0,06 мм, мінімальне – 0 мм



Епюра деформації.
Максимальне значення $8,6 \cdot 10^{-4}$, мінімальне – $5,4 \cdot 10^{-8}$



Епюра коефіцієнта запасу міцності.
Значення становить 1,9