

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Сумський державний університет

Факультет технічних систем та енергоефективних технологій

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра технології машинобудування, верстатів та інструментів

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Віталій ІВАНОВ

(підпис)

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

(бакалавр/магістр)

зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»

(код та назва)

освітньо-професійної програми «Технології машинобудування»

(освітньо-професійної/освітньо-наукової)

(назва програми)

на тему: Удосконалення технологічного процесу виготовлення

обойми 1.3000-357.31.01 шляхом інтенсифікації операції свердління

Здобувача групи ТМ.м-31

(шифр групи)

Ілюхіна Михайла Ігоровича

(прізвище, ім'я, по батькові)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Михайло ІЛЮХІН

(підпис)

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Керівник

канд. техн. наук, ст. викладач Анна НЕШТА

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Нормоконтролер доцент, канд. техн. наук, доцент Артем ЄВТУХОВ

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Суми – 2024

**ЗАКЛАД ВИЩОЇ ОСВІТИ УКРАЇНИ**  
**«Сумський державний університет»**

Інститут, факультет	факультет технічних систем і енергоефективних технологій
Кафедра	технології машинобудування, верстатів та інструментів
Освітньо-науковий рівень	другий (магістерський) <small>(назва)</small>
Спеціальність	131 – прикладна механіка <small>(шифр і назва)</small>
Освітня програма	технології машинобудування <small>(назва освітньої програми, за наявності)</small>

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів

\_\_\_\_\_ Віталій ІВАНОВ

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 року

**ЗАВДАННЯ**  
**ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ (ПРОЄКТУ) ЗДОБУВАЧА**

**Ілюхін Михайло Ігорович**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) «Удосконалення технологічного процесу

виготовлення обойми 1.3000-357.31.01 шляхом інтенсифікації операції свердління»

керівник проекту Нешта Анна Олександрівна канд. техн. наук, старший викладач, доцентка

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від «12» листопада 2024 року за №1176-VI

2. Строк подання студентом роботи (проєкту) «15» грудня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи (проєкту)

Креслення деталі «Обойма 1.3000-357.31.01».

Типовий технологічний процес виготовлення деталі обойма.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Виконати аналіз первинної інформації про деталь.

2. Удосконалити технологічний процес виготовлення деталі.
3. Проєктування верстатного пристрою для свердлильної операції.
4. Розглянути питання охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях.

5. Консультанти розділів роботи (проєкту)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання ви- дав	завдання прийняв

6. Дата видачі завдання «25» вересня 2024 року

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи (проєкту)	Строк виконання етапів роботи (проєкту)	Примітка
1	1. Аналіз первинної інформації про деталь	01.10.2024	
2	2. Удосконалення технологічного процесу виготовлення деталі	15.10.2024	
3	3. Розроблення верстатного пристрою	01.11.2024	
4	Підготовка розділу з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях	01.12.2024	
5	Формулювання загальних висновків	10.12.2024	
6	Підготовка доповіді	12.12.2024	
7	Підготовка презентації	12.12.2024	
8	Оформлення роботи	14.12.2024	

**Здобувач**

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Михайло ІЛЮХІН**

\_\_\_\_\_ (ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

**Керівник роботи (проєкту)**

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Анна НЕШТА**

\_\_\_\_\_ (ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка виконана на 91 сторінці, включає 18 рисунків, 9 таблиць, бібліографії із 15 джерел.

При виконанні механічного оброблення деталей типу обойма трудомістким є оброблення отворів на свердлильній операції. Підвищення продуктивності можливо за рахунок зменшення кількості проходів, що у свою чергу призводить до необхідності збільшення глибини різання. Тому сили різання зростають, що часто супроводжується можливою появою вібрацій. Через це необхідно застосувати спеціальний верстатний пристрій достатньої жорсткості, але при цьому бути з достатніми габаритами і не використовувати надлишковий матеріал. Торцеві фрезС-вердла з механічним кріпленням непереточувальних пластин є високопродуктивним інструментом, які дозволяють швидко проводити оброблення отворів, проте для цього необхідно забезпечити достатню жорсткість.

**Метою дослідження** є удосконалення технологічного процесу виготовлення обойми 1.3000-357.31.01 шляхом інтенсифікації операції свердління.

**Об'єкт дослідження:** технологічний процес оброблення обойми.

**Предмет дослідження:** верстатний пристрій для установаження обойми на свердлильній операції.

**Наукова новизна:** за допомогою методик проведення інженерного та оптимізаційного аналізів та досліджень розроблено, оптимізовано та теоретично перевірено конструкцію спеціального верстатного пристрою для оброблення обойми на свердлильній операції. Встановлено величини напружень та переміщень, а також частоти власних коливань чисельними методами.

ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС, ОБОЙМА, РЕЖИМ РІЗАННЯ,  
ОПТИМІЗАЦІЯ, СВЕРДЛО

## ABSTRACT

The explanatory note consists of 91 pages, including 18 figures, 9 tables, and a bibliography of 15 sources.

During the mechanical processing of parts like the bearing race, the drilling operation is labor-intensive. Productivity can be increased by reducing the number of passes, which in turn necessitates an increase in the depth of cut. As a result, cutting forces increase, often leading to potential vibrations. Therefore, it is necessary to apply a special machine fixture with sufficient rigidity but also with adequate dimensions and without using excessive material.

Face milling drills with mechanical clamping of indexable inserts are a high-performance tool that allows for rapid hole machining, but sufficient rigidity must be ensured for this.

The aim of the study is to improve the technological process of manufacturing the clip 1.3000-357.31.01 by intensifying the drilling operation.

**Object of study:** the technological process of processing the bearing race.

**Subject of study:** a machine fixture for installing the bearing race during the drilling operation.

**Scientific novelty:** using engineering and optimization analysis methods, as well as research, a special machine fixture for drilling the bearing race was developed, optimized, and theoretically verified. The values of stresses and displacements, as well as natural vibration frequencies, were determined using numerical methods.

TECHNOLOGICAL PROCESS, CLIP, CUTTING MODE, OPTIMIZATION,  
DRILL

## ЗМІСТ

Вступ.....	5
Розділ 1 Аналіз технологічного процесу виготовлення деталі .....	7
1.1 Аналіз службового призначення машини, вузла деталі. опис конструктивних особливостей деталі і умов експлуатації .....	7
1.2 Аналіз технічних умов та вимог до конструкції деталі. визначення технологічних завдань щодо її виготовлення .....	13
1.3 Характеристика типу виробництва та організаційної форми виробництва.....	16
1.4 Аналіз технологічності конструкції деталі.....	17
1.5 Аналіз базового або типового технологічного процесу.....	21
1.6 Висновки та завдання для удосконалення технологічного процесу виготовлення деталі .....	22
Розділ 2 Удосконалення технологічного процесу виготовлення деталі .....	23
2.1 Складання варіантів технологічних маршрутів та вибір оптимального .....	23
2.2 Обґрунтування способу отримання, розрахунок та формулювання технічних вимог на виготовлення первинної заготовки .....	24
2.3 Призначення та обґрунтування схем базування та закріплення .....	28
2.4 Обґрунтування та вибір моделей металорізальних верстатів .....	33
2.5 Обґрунтування та вибір верстатних пристроїв, різального та вимірювального інструментів .....	35
2.6 Розрахунок режимів різання .....	36
2.7 Проектування засобів технологічного оснащення .....	41
Розділ 3 Наукове дослідження .....	54
3.1. Аналіз стану досліджень у галузі розроблення верстатних пристроїв.....	54
3.2 Розроблення 3d – моделі конструкції верстатного пристрою та його інженерне дослідження методом скінчено-елементного аналізу .....	54
3.3 Висновок .....	63
Висновки .....	64
Список джерел посилань .....	65

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Машинобудування є однією з найважливіших галузей промисловості. Його продукція – машини різного призначення – постачаються всім галузям народного господарства. Темпи переозброєння їх новою технікою значною мірою залежить від рівня розвитку машинобудування. Перехід машинобудування на нові методи управління, застосування нових досягнень та розробок науки, впровадження наукомістких технологій та розширення номенклатури виробів призведе до підвищення рівня усіх суміжних галузей промисловості.

Технічний прогрес у машинобудуванні характеризується як поліпшенням конструкцій машин, а й безперервним удосконаленням технології їх виробництва. Важливо якісно та в задані терміни виготовити машину з мінімальними витратами матеріалів, енергії, живої та уречевленої праці. У технології машинобудування вирішуються завдання з усіх технологічних переділів – від отримання заготівлі до приймання зібраних виробів. Однак велика увага приділяється кінцевим етапам виробництва – механічній обробці заготовок та збиранню машин. Ці процеси найбільш трудомісткі (80-90% всієї трудомісткості виготовлення виробів) та взаємопов'язані між собою; вони є визначальними у всьому циклі виробництва машин. Перед технологами та конструкторами машинобудування стоять завдання підвищення якості машин, зниження трудомісткості, собівартості та матеріаломісткості, впровадження потокових методів роботи, механізації та автоматизації виробництва, а також скорочення термінів підготовки виробництва нових об'єктів. Тому найбільш важливими напрямками розвитку технології механічної обробки в машинобудуванні стали інтенсифікація технологічних процесів на основі застосування різальних інструментів з нових інструментальних матеріалів, підвищення розмірної та геометричної точності, що досягається при обробці, розширення сфери застосування обладнання з ЧПК, створення повністю автоматизованих систем проектування, управління та підготовки виробництва.

Неухильне розширення галузі застосування гідравлічних насосів та вдосконалення виробництва насосів вимагають від сучасного інженера-

машинобудівника теоретичних знань та практичних навичок, для раціонального проектування, виготовлення насосів та використання виробленої ними гідравлічної енергії.

**Метою дослідження** є удосконалення технологічного процесу виготовлення обойми 1.3000-357.31.01 шляхом інтенсифікації операції свердління.

**Об'єкт дослідження:** технологічний процес оброблення обойми.

**Предмет дослідження:** верстатний пристрій для установаження обойми на свердлильній операції.

**Наукова новизна:** за допомогою методик проведення інженерного та оптимізаційного аналізів та досліджень розроблено, оптимізовано та теоретично перевірено конструкцію спеціального верстатного пристрою для оброблення обойми на свердлильній операції. Встановлено величини напружень та переміщень, а також частоти власних коливань чисельними методами.

**Методи дослідження.** Результати роботи базуються на теоретичних основах технології машинобудування, теорії різання, різального інструменту, чисельного моделювання. Також у роботі використовувались комп'ютерне моделювання в середовищі SolidWorks.

**Апробація результатів кваліфікаційної роботи магістра.** Немає.

**Публікації.** Немає.

**Структура й обсяг кваліфікаційної роботи магістра.** Робота складається із вступу, трьох розділів, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг кваліфікаційної роботи магістра становить 91 сторінку, у тому числі 18 рисунків, 9 таблиць, бібліографії із 15 джерел на двох сторінках.



## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ

#### 1.1 Аналіз службового призначення машини, вузла деталі. Опис конструктивних особливостей деталі і умов експлуатації

Предметом дослідження даного розділу є детальний аналіз технологічного процесу виготовлення обойми, яка є ключовим елементом торцевого ущільнення живильного насоса. Цей тип насосного обладнання широко застосовується в енергетиці для подачі води у парогенератори енергоблоків. Зважаючи на важливість безперебійної роботи насоса, особлива увага приділяється забезпеченню високої точності та якості виготовлення обойми, яка безпосередньо впливає на герметичність ущільнення. У рамках дослідження буде проведено аналіз існуючих технологічних операцій, оцінено їх ефективність та запропоновані можливі шляхи оптимізації з метою підвищення продуктивності та якості виробництва.

Живильні насоси призначені для подачі чистої води в магістралі. Вони забезпечують подачу води в барабанні або прямоточні парові котли, що працюють на дровах, вугіллі, дизельному паливі. Насос рекомендується для агрегатів, тиск пари в яких становить не більше 4,5 МПа.

Живильні насоси НЦН – Е 800–80–1 (табл. 1.1) призначені для живлення парогенераторів середнього та високого тиску живильною водою з температурою не більше 448К (155 °С), водневим показником рН 7 ... 9,5, вмістом твердих часток не більше 5 мг/л, розміром не більше 0,2 мм, а також інших нейтральних рідин схожих з живильною водою за в'язкістю та хімічної активності.

Таблиця 1.1 – Технічна характеристика насоса

Найменування параметра	Одиниця вимірювання	Числове значення
Подача	м <sup>3</sup>	270
Напір	м	1650
Частота обертання	об/хв	2873
Потужність	кВт	1445
ККД	%	76
Допустимий кавітаційний запас	м	11

Конструкція насоса типу НЦН розроблена з урахуванням створення на одній корпусних базі насосів з напорами 1900, 1775, 1650, 1525, 1422, 1250, 1125, 1000 метрів шляхом зміни кількості ступенів.

Насос типу НЦН є відцентровим, горизонтальним, секційним та однокорпусним пристроєм з одностороннім розташуванням робочих коліс. Він оснащений підшипниками ковзання, автоматичним розвантажувальним механізмом і кінцевими ущільненнями валу, які можуть бути як торцевими, так і сальниковими.

Для компенсації осьових сил, що виникають під час роботи, застосовується автоматичний розвантажувальний пристрій (гідроп'ята). Гідроп'ята складається з роторного та статорного кілець із релітовим наплавленням, які можна замінювати під час експлуатації.

Для моніторингу осьового переміщення ротора у випадку зносу деталей гідроп'яти використовується спеціальний датчик, що контролює зміщення.

Ущільнення валу в зоні його виходу з насоса забезпечується торцевим ущільненням. У конструкції передбачено промивку торцевого ущільнення, щоб запобігти утворенню кристалів солей під час роботи або зупинки насоса. Промивання здійснюється за допомогою штатного трубопроводу, і рекомендована частота цієї процедури становить один раз за зміну.

Конструктивно насос складається з корпусних деталей і роторної частини.

Насоси та агрегати виготовляються в загальнопромисловому виконанні і можуть встановлюватися в приміщеннях класу вибухонебезпечної зони В у відповідності з ПУЕ та ВНД- 8 - 73 (наявність сірководню в зоні гранично допустимої концентрації).

Вхідний і напірний патрубок – спрямовані вертикально вгору. Уникнення перетікання води по валу, є щільний металевий контакт в стиках. У секціях по посадці посаджені направляючі апарати. Від проворота направляючі апарати стопоряться в секціях.

Ротор насоса складається з робочих коліс, посаджених на вал по посадці на шпонки, захисних втулок, гільз, і інших деталей збираються на валу. Для запобі-

гання попадання масла до підшипників, передбачені колеса маслоотбойние на валу. Опорами ротора служать підшипники.

Насос не призначений для роботи в лужних середовищах. Його експлуатація допускається лише в закритих приміщеннях, на горизонтальній поверхні, без наявності вібрацій, і з обов'язковим закріпленням на монтажній основі.

Вал ротора ущільнюється за допомогою механічного торцевого ущільнення. Осьові сили компенсуються гідравлічною п'ятою. Напрямок обертання ротора правостороннє (за годинниковою стрілкою) при спостереженні з боку приводного кінця вала, що також позначено стрілкою на вхідній кришці.

У якості приводу для насоса використовується асинхронний електродвигун моделі 4AM275M2У3. З'єднання насоса з електродвигуном здійснюється за допомогою пластинчастої напівмуфти.

До комплекту обладнання додаються вимірювальні прилади, такі як манометр і манометр-вакуумметр, для контролю тиску на вході й виході насоса.

Живильні насоси повинні відповідати низці специфічних вимог:

- конструкція насоса повинна мати зовнішню і внутрішню герметичність і допускати температурне розширення при змінній температурі рідини, що перекачується.

- насос повинен бути динамічно стійким у всьому діапазоні робочих режимів.

- насоси повинні працювати надійно і тривало (не менше 10 тис. ч) без помітного зниження параметрів і заміни основних деталей і вузлів.

- для запобігання зворотного обертання і недопустимого нагріву води при малих подачах насоси повинні забезпечуватися зворотними клапанами з лінією рециркуляції.

Даний виріб «Торцеві ущільнення 1.3000-357.30.00 СК» – механічне ущільнення, що використовується в обертовому обладнанні для забезпечення герметизації вала, використовується в насосах, мішалках, компресорах та в хімічних реакторах. Загальний вигляд виробу показаний на рисунку 1.1.

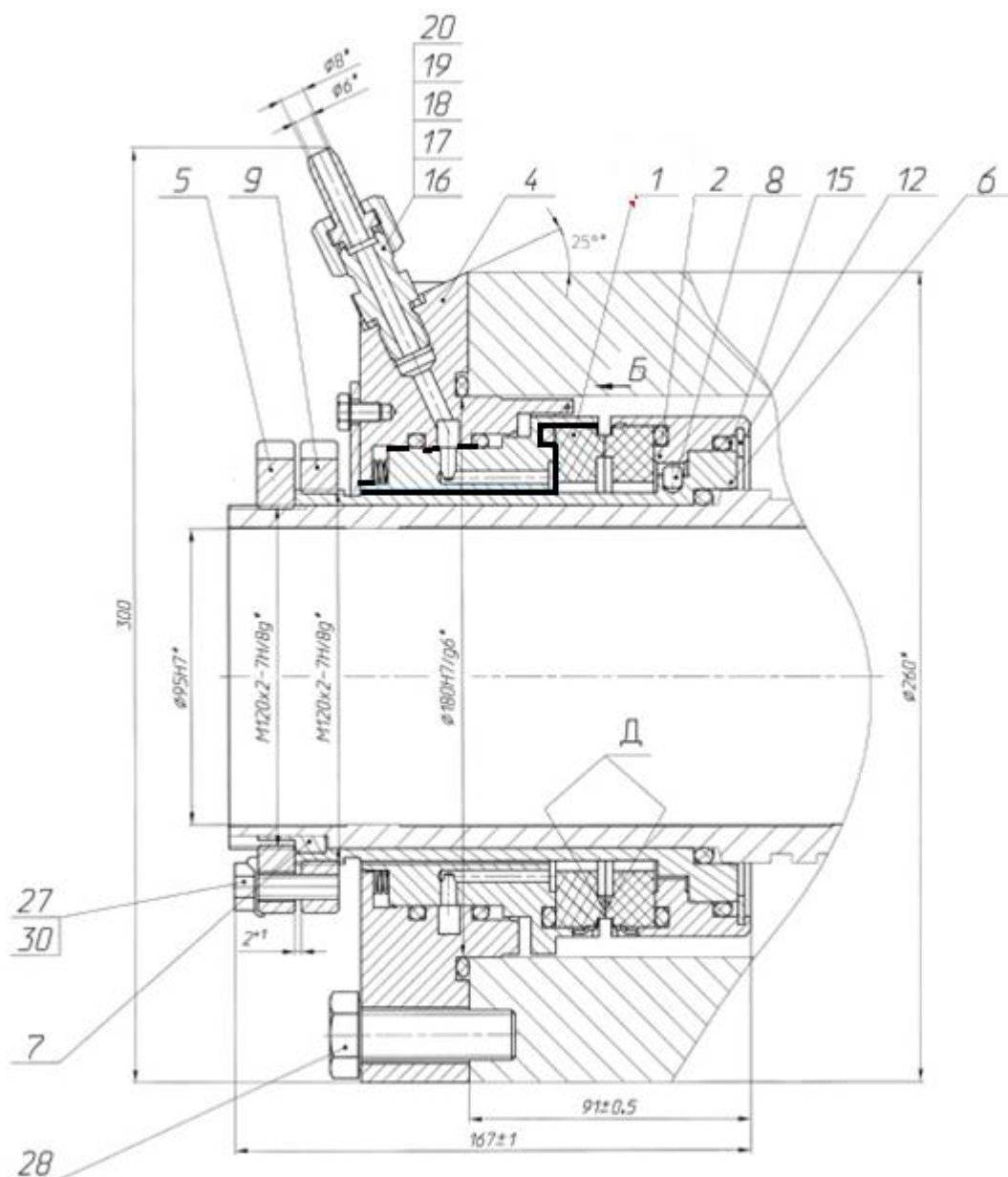


Рисунок 1.1– Фрагмент креслення виробу  
«Торцеві ущільнення 1.3000-357.30.00 СК»

Торцеві механічні ущільнення ефективно замінюють сальникові набивки у різних сферах застосування. Їх використання дозволяє значно зменшити втрати рідини в обладнанні.

Підсумовуючи, торцеве ущільнення валу насоса – це пристрій, який забезпечує герметизацію простору між корпусом насоса та обертовим приводним валом, що входить у рідинну камеру насоса.

Ефективність торцевого ущільнення залежить від двох ключових чинників: здатності витримувати тиск у рідинній камері насоса та тертя обертового вала. Іншими словами, ущільнення має забезпечувати повну герметичність і виключати протікання.

Хоча торцеві ущільнення позбавлені багатьох недоліків сальникових набивок, вони є дорожчими і потребують високого рівня кваліфікації під час вибору, встановлення, експлуатації та заміни.

Торцеве ущільнення складається з двох основних частин: нерухомої частини та рухомої, яка встановлюється на вал насоса. Рухома частина обертається разом із валом і щільно притискається до нерухомої поверхні за допомогою спеціальних пружин, забезпечуючи ковзання однієї поверхні ущільнення по іншій.

Технічна характеристика виробу «Торцеві ущільнення»:

- тиск рідини  $P = 12$  бар (174 PSI);
- температура робочого середовища  $t = -20$  °C ... +160 °C;
- швидкість обертання валу (лінійна швидкість): до 3000 об/хв (15 м/с)
- зміст твердої фази ... 7 %;
- матеріали основних деталей: рухоме кільце та контркільце: карбід кремнію (Q1), карбід вольфраму (U7), повторні ущільнення: FKM (V), металеві деталі: сталь 08X18H10T.

Деталь «Обойма 1.3000-357.31.00» призначена для монтажу ущільнень 1, які забезпечують герметичність виробу «Торцеві ущільнення».

Деталь «Обойма 1.3000-357.31.00 належить до класу «втулки» і має основні та допоміжні конструкторські бази, які позначені на рисунку 1.2.

На рисунку 1.2 зображена деталь «обойма» з нумерацією поверхонь, а в таблиці 1.2 вказана класифікація поверхонь деталі.

Поверхні 15, 17 є виконавчими, з їх допомогою деталь виконує своє службове призначення, а саме це поверхні піджимають ущільнюючі кільця.

Таблиця 1.2 – Класифікація поверхонь деталі

Класифікація поверхні	№ поверхні
Виконавчі	15,17
Основні конструкторські бази	7,11
Допоміжні конструкторські бази	12,15,17
Вільні	1,2,3,4,5,6,8,9,10,14,16

Поверхні 7, 11 є основними конструкторськими базами, ці поверхні визначають положення самої деталі у вузлі.

Поверхні 12, 15, 17 є допоміжними конструкторськими базами, до цих поверхонь приєднуються інші деталі – ушільнюючі кільця та рубашка.

Всі інші поверхні є вільними і визначають лише форму і розміри деталі та з'єднують виконавчі та базові поверхні.

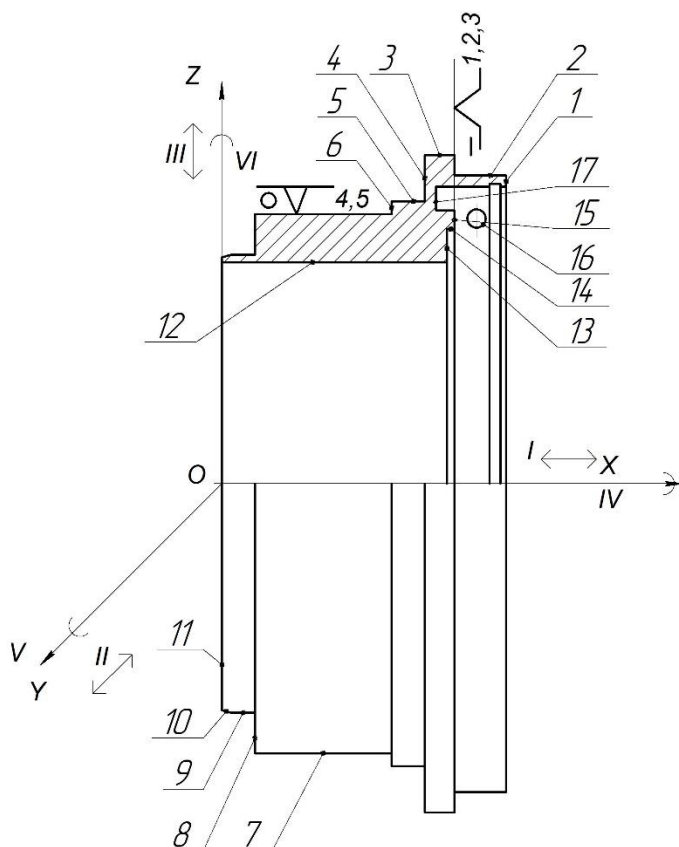


Рисунок 1.2 – Ескіз деталі з базами

Умови експлуатації.

Деталь «Обойма» при роботі в вузлі відчуває крутильні і циклічні навантаження. Навантаження сприймають поверхні шпонкових пазів, що працюють на зминання та зріз.

Деталь і виріб, також як верстат вцілому експлуатується в помірних умовах в діапазоні температур від -20 до + 20 °С.

Шум на рівні 55÷90 Дб.

## 1.2 Аналіз технічних умов та вимог до конструкції деталі. Визначення технологічних завдань щодо її виготовлення

Технічні вимоги до виготовлення виробу або складальної одиниці визначають ключові параметри якості, які перевіряються під час фінального контролю чи випробувань. Точне формулювання цих вимог є критично важливим етапом у процесі проєктування.

Креслення деталі містить усю необхідну інформацію про її конфігурацію, конструкцію, розміри, точність форми поверхонь, а також матеріал і його властивості. Це дозволяє повністю описати геометрію та характеристики деталі, що є основою для її виготовлення, складання та контролю якості. Креслення слугує засобом комунікації між конструктором, інженерами й виробничим персоналом, забезпечуючи відповідність виробу технічним вимогам, функціональність і високу якість.

Деталь "обойма" є тілом обертання з відношенням довжини до діаметра, виготовленим зі сталі 08X18H10T — хромонікелевого нержавіючого сплаву, хімічний склад якого наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Фізико-механічні властивості сталі 08X18H10T та її заміників

Матеріал	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\Psi$ , %	Твердість НВ	Хімічний склад, %					
				C	Ni	Ti	Cr	P	S
Сталь 08X18H10T	630	45	193-198	0,06-0,1	9,8-10,3	0,8-1,1	17,8-19,2	Дуже мала доля	
Сталь 12X18H10T	640	40	190-194	0,08-0,16	9,8-10,3	0,8-1,1	17,8-19,2		
Сталь 14X17H2	650	40	196-199	0,1-0,15	1,9-2,3	-	16,8-18,2		

Сталь 08X18H10T належить до аустенітних нержавіючих сталей, що характеризуються високою корозійною стійкістю в різних середовищах, включаючи кислі, нейтральні та слабколужні. Цей матеріал широко використовується в промисловості, зокрема у виробництві харчових продуктів, хімічній промисловості, фармацевтиці, медичному обладнанні, будівництві та інших сферах, де важливі міцність і стійкість до корозії.

Інформацію про механічні властивості сталі наведено в таблицях 1.4 і 1.5. Серед матеріалів-замінників можна виділити сталь 14XH2MA та сталь 12X18H10T.

Таблиця 1.4 – Механічні властивості сталі 08X18H10T

Сортамент	Термообробка	Показник	T= +20 °C	T= -25 °C
Пруток	Закалювання при 1050 °C, вода	KCV, Дж/см <sup>2</sup>	216	181
Пруток		KCV, Дж/см <sup>2</sup>	167	147

Таблиця 1.5 – Механічні властивості сталі 08X18H10T при випробуваннях на тривалу міцність

Температура випробувань °C	Межа текучості МПа	Швидкість текчості %/час	Межа міцності МПа	Час випробувань, год
600	74	1/100000	147	10000
650	29 - 39	1/100000	78 - 98	10000

Вибір матеріалу для цієї деталі є обґрунтованим, оскільки в процесі експлуатації вона повинна забезпечувати міцність і надійність протягом визначеного терміну служби. Сталь 08X18H10T є оптимальним вибором завдяки своїм властивостям, попри її вищу вартість порівняно зі сталлю 45. Застосування цього матеріалу є необхідним для забезпечення стабільної та безвідмовної роботи механізму. Проте слід враховувати, що обробка сталі 08X18H10T різанням є доволі складною.



Функціональні елементи конструкції деталі включають чотири отвори для встановлення демпферів, які утримують кільце; двадцять отворів для демпферів, що фіксують обойму; а також чотири пази, призначені для утримання обойми.

Матеріал, обраний для виготовлення деталі, повинен відповідати вимогам державних і галузевих стандартів, а також технічним вимогам, зазначеним на кресленні. Під час виготовлення деталі необхідно дотримуватися встановлених допусків, щоб забезпечити належну якість і точність виробу. Нижче розглянемо деякі з цих допусків.

Вимоги щодо точності розмірів: найбільш точними поверхнями деталі є циліндричні поверхні отвору  $\varnothing 161H9$ , 2 отворів  $\varnothing 5H7$  які потребують використання кутової головки та більш точного інструменту. Отвори  $\varnothing 4$  мм, на глибину 35 мм що потребує використання додаткового різального інструменту.

Багато поверхонь мають низьку шорсткість  $Ra=1,6$  мкм.

Пази що ущільнюють кільця мають складну конфігурацію. Наявність поверхонь з шорсткість поверхонь –  $Ra 6,3$  мкм та  $Ra 1,6$  мкм викликає необхідність застосування багатоетапної обробки. Малі радіуси заокруглення  $R0,2$  та  $R0,3$  також ускладнюють виготовлення пазів. .

Незазначені граничні відхилення розмірів  $H14$ ,  $h14$ ,  $\pm IT14/2$  відповідають вимогам точності обробки для поверхонь, на які не накладено спеціальних вимог. Це означає, що розміри отворів повинні бути у межах  $H14$ , а розміри валів – у межах  $h14$ , з допустимим відхиленням лінійних розмірів  $\pm IT14/2$ . Ці поверхні не виконують важливу функцію і використовуються лише для конфігурації деталі, такі як посилення або технологічні поверхні. Ця вимога дозволяє вносити розміри без необхідності зазначення їх на кресленні.

Для підвищення продуктивності виробництва та відповідності чинних стандартів рекомендовано використовувати позначення відхилень за нормами ДСТУ ISO 2768-1 та ДСТУ ISO 2768-2.

Щодо вимог до шорсткості поверхонь, необхідно забезпечити певний ступінь прилягання та контактної жорсткості між з'єднаними поверхнями. Шорсткість впливає на площину контакту та опорну поверхню: чим більша шорсткість, тим

менша площа контакту. Основні та базові поверхні повинні мати шорсткість на рівні  $Ra = 1,6$  мкм. Усі інші поверхні повинні мати шорсткість на рівні  $Ra = 6,3$  мкм.

Жорсткі допуски форми та розташування поверхонь, зазначені на кресленні, роблять деталь малотехнологічною за цим параметром. Досягнення таких допусків можливе лише на етапі чистової обробки.

Деталь також містить кілька конструктивних елементів, які ускладнюють її виготовлення, зокрема шпонкові пази. Для їх обробки доцільно використовувати верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК) та спеціалізовані верстатні пристрої.

Загалом креслення виконане відповідно до вимог Єдиної системи конструкторської документації (ЄСКД), хоча й містить деякі незначні недоліки, згадані вище. На кресленні (додаток А) достатньо видів і розрізів для коректного відображення форми деталі та забезпечення можливості її виготовлення. Усі необхідні розміри також зазначені.

### **1.3 Характеристика типу виробництва та організаційної форми виробництва**

Тип виробництва по ГОСТ 3.1108-74 характеризується коефіцієнтом закріплення операцій  $K_{з.о.}$ .

Виконаємо розрахунок  $K_{з.о.}$  програмним методом за допомогою ЕОМ, використовуючи у якості вхідних даних норми часу по виготовленню деталі із базового технологічного процесу на відповідних операціях (табл. 1.2). В таблиці час вказано лише на механічні операції. Річний обсяг випуску – 1000 штук.

За результатами розрахунку, які наведені в додатку Б,  $K_{з.о.} = 29,9$  що говорить про те, що тип виробництва дрібносерійний, і раціонально обрати форму організації робіт – групову.

Таблиця 1.6 – Технологічний процес виготовлення деталі Вал ведучий

№ операції	Найменування операції	$T_{шт, хв}$	$m_p$	P	$\eta_{з.ф}$	O
1	Токарно-гвинторізна	5,78	0,0319	1	0,0319	23,51
2	Токарна з ЧПК	4,59	0,025	1	0,025	30
3	Вертикально-фрезерна	5,34	0,029	1	0,029	15,86
4	Свердлильна	6,33	0,035	1	0,035	21,43
5	Вертикально-фрезерна	6,33	0,035	1	0,035	11,43
Сума:				5		105,87

Цій формі організації робіт характерні особливості, а саме заготовки обробляються невеликими партіями, заготовки - в основному кування і лиття в піщано-глинисті форми (рідко точне лиття і штампування). Устаткування використовується універсальне і спеціалізоване. В основному використовують універсальні верстати, також широко використовуються верстати з ЧПК. Устаткування розставляються по технологічним групам. Різальний та вимірювальний інструмент застосовують як стандартний, так і спеціальний.

Середня кваліфікація робітників вище, ніж в масовому виробництві, але нижче ніж в одиничному.

#### 1.4 Аналіз технологічності конструкції деталі

Оцінка технологічності конструкції виконується за якісними показниками, що аналізуються на етапі вивчення конструкції деталі та визначення технологічних вимог до її виготовлення й приймання.

Аналіз технологічності деталі *обойма* спрямований на підвищення продуктивності, зниження витрат і скорочення часу, необхідного для проектування, підготовки виробництва, виготовлення, технічного обслуговування та ремонту, при цьому забезпечуючи належну якість виробу, безпеку праці та дотримання екологічних вимог. Чим простіша конструкція деталі, тим менша її трудомісткість і вартість виготовлення, що відповідає принципам технологічності.

Матеріал для виготовлення деталі — сталь 08X18H10T, яка належить до класу аустенітних хромонікелевих нержавіючих сталей. Цей сплав широко використовується в промисловості, зокрема в хімічній, нафтово-газовій, харчовій та фармацевтичній галузях.

Основні хімічні компоненти сталі 08X18H10T наведено в таблиці 1.2. Вона має високу стійкість до корозії в агресивних середовищах, особливо у водних розчинах хлоридів та хлоридних іонів, які часто зустрічаються в морській воді та хімічних процесах. Крім того, сталь демонструє високу стійкість до окислення, корозії й дії високих температур. Її властивості відповідають стандартам харчової безпеки, що дозволяє використовувати цей матеріал для виробів, які контактують із харчовими продуктами.

Оброблюваність цієї сталі є низькою, що ускладнює її технологічну обробку. Вона має обмежену зварюваність і складність механічної обробки, однак це дає можливість створювати деталі та з'єднання з високою точністю. Сталь підходить для термічної обробки, зокрема для загартування та відпускання, що дозволяє досягати оптимальних фізико-механічних характеристик.

Сфера використання сталі 08X18H10T охоплює виробництво труб, фітінгів, клапанів, насосів, теплообмінників, резервуарів для зберігання рідин, обладнання для харчової промисловості та фармацевтичної техніки.

Вартість сталі 08X18H10T залежить від ринкової ситуації, постачальника та обсягу замовлення. Зазвичай, нержавіюча сталь, включно з цією маркою, відрізняється високою якістю, тому її ціна перевищує вартість інших сплавів. На ціну впливають такі чинники, як розмір, форма, складність виробу, методи виробництва та регіональний аспект.

Заготовка, яка потребує обробки, має форму, що значно відрізняється від кінцевого виробу. Коефіцієнт використання матеріалу становить 0,278, що вказує на неефективність методу виготовлення заготовки. Матеріал характеризується високою міцністю, твердістю і в'язкістю, що ускладнює його механічну обробку.

Обробка 20 отворів діаметром 8,7 мм та довжиною  $L=14$  мм, які розташовані по  $\varnothing 134$ , викликає труднощі при механічній обробці. Її можливо реалізувати на

спеціальному обладнанні або із застосуванням складних пристроїв, що значно знижує технологічність.

Фрезерування двох пазів R3 з довжиною  $L=25$  мм та чотирьох торцевих пазів розміром  $11 \times 5,5$  мм є не технологічним, оскільки вимагає використання додаткового різального інструменту та кутової головки.

Свердління 4 отворів  $\varnothing 5$  мм потребує використання кутової головки, а свердління двох отворів  $\varnothing 5$  H7 ще потребує додаткового інструменту, що суттєво знижує технологічність.

Значні труднощі викликають при свердленні отворів  $\varnothing 4$  мм, на глибину 35 мм що потребує використання додаткового різального інструменту та збільшує трудомісткість виготовлення деталі.

Конструкція деталі є тонкостінною, що зменшує її жорсткість і може негативно вплинути на точність та розміри готової деталі.

Багато поверхонь мають низьку шорсткість  $Ra=1,6$  мкм, що є не технологічним.

Пази що ущільнюють кільця мають складну конфігурацію. Наявність поверхонь з шорсткість поверхонь –  $Ra$  6,3 мкм та  $Ra$  1,6 мкм викликає необхідність застосування багатоетапної обробки. Малі радіуси заокруглення  $R0,2$   $R0,3$  також ускладнюють виготовлення пазів.

Інші оброблювальні поверхні з точки зору точності та шорсткості не викликають технологічних труднощів і дозволяють проводити обробку на прохід, а також можуть бути оброблені високопродуктивними методами. Враховуючи всі ці фактори, можна стверджувати, що технологічність деталі знижена..

В цілому ж конструкція деталі технологічна і більшого вдосконалення, ніж це вже зроблено у кресленні без шкоди для службового призначення деталі і виробу, на даному етапі розвитку науки і техніки запропонувати неможливо.

Кількісний аналіз технологічності деталі.

Визначаємо коефіцієнт точності обробки:

$$K_T = 1 - 1/T_{cp} > 0.8 \quad (1.1)$$

де  $T_{cp}$  – середньоарифметичне значення квалитетів точності.

$$T_{cp} = \frac{14 \cdot 22 + 11 \cdot 1 + 10 \cdot 1 + 9 \cdot 2 + 8 \cdot 1 + 7 \cdot 1}{28} = \frac{308 + 11 + 10 + 18 + 8 + 7}{28} = 12,93$$

$$K_m = 1 - \frac{1}{12,93} = 0,92 > 0,8.$$

За цим показником деталь технологічна.

Визначаємо коефіцієнт шорсткості:

$$K_{ш} = 1 - \frac{1}{Ш_{д.ср.}}, \quad (1.2)$$

де  $Ш_{д.ср.}$  - середня шорсткість усіх поверхонь.

$$Ш_{д.ср.} = \frac{6,3 \cdot 16 + 1,6 \cdot 7}{24} = \frac{100,8 + 11,2}{24} = 4,67$$

$$K_{ш} = 1 - \frac{1}{4,67} = 0,89 > 0,32.$$

За цим показником деталь технологічна.

Коефіцієнт використання матеріалу визначаємо за формулою:

$$K_{в.м} = \frac{M_d}{M_з}, \quad (1.3)$$

де  $M_d$  - маса деталі,  $M_d = 2,8 \text{ кг}$ ;

$M_з$  - маса заготовки,  $M_з = 4,57 \text{ кг}$ ;

$$K_{в.м} = \frac{2,8}{4,57} = 0,61.$$

У цілому, аналізуючи технологічність деталі «Обойма торцевого ущільнення» можемо сказати, що деталь має ряд нетехнологічних елементів, які ускладнюють обробку та збільшують трудомісткість її виготовлення. Але, не зважаючи на те, всі елементи обумовлені службовим призначенням, умовами експлуатації та технічними вимогами до неї.

### 1.5 Аналіз базового або типового технологічного процесу

Даний розділ виконується на основі базового технологічного процесу. У цьому процесі послідовність механічної обробки відповідає стандартним етапам побудови технологічного процесу, проте присутні певні недоліки.

У цьому пункті аналізуються недоліки типового технологічного процесу обробки торців вала ведучого під час фрезерно-центрувальної операції.

Технологічний процес виготовлення деталі "Обойма" у заводському варіанті організовано як маршрутний, що відповідає одиничному типу виробництва. Процес складається з 15 операцій, з яких 7 є механічними, а решта включають контроль, слюсарні та розмічувальні роботи.

Аналіз базового технологічного процесу виявив такі недоліки:

- загалом, вибір операцій обробки виконаний правильно, проте наявні незначні недоліки, які можуть бути спричинені додатковими вимогами конструктора.
- металообробні верстати використовуються універсальні на всіх етапах, що знижує точність обробки, збільшує час виконання та підвищує собівартість деталі. За сучасних умов конкуренції доцільно застосовувати більш прогресивне обладнання, таке як верстати з ЧПК, які забезпечують обробку на високих швидкостях різання, мають жорстку конструкцію та гарантують необхідну точність.
- у маршрутному технологічному процесі не деталізовано способи базування та закріплення заготовок, операційні розміри, а також перелік різального та вимірювального інструменту.
- використання застарілого інструменту з напаяними пластинами обмежує можливості обробки на сучасних верстатах із ЧПК. Рекомендується заміна інструментів на сучасні різці з непереточуваними багатогранними твердосплавними пластинами, а також використання твердосплавних свердел та фрез замість інструменту зі швидкорізальної сталі.
- застарілий вимірювальний інструмент, як-от безшкальні скоби та калібри, є дорогим для даного типу виробництва. Необхідно розробити нові

вимірювальні пристрої, які будуть економічнішими, точнішими та універсальнішими.

Хоча режими різання розраховані правильно, їх використання обмежується застарілим обладнанням і матеріалами інструментів. Сучасні верстати дозволяють працювати на більш прогресивних і форсованих режимах, що дає змогу скоротити час обробки та підвищити точність виготовлення деталей за умови усунення зазначених недоліків.

### **1.6 Висновки та завдання для удосконалення технологічного процесу виготовлення деталі**

Враховуючи проведений аналіз у попередніх пунктах, можна зробити проміжні висновки, щодо існуючої ситуації по технологічному процесу оброблення поверхонь Вала ведучого на фрезерно-центрувальній операції, а саме:

- у базовому технологічному процесі застосовуються застарілі верстати, верстатні пристрої, різальні та вимірювальні інструменти;
- матеріал деталі – конструкційна сталь, що не накладає обмеження по режимам оброблення;
- застосована схема установа у базовому технологічному процесі є нерациональною, адже не забезпечує достатню жорсткість.

Враховуючи це, а також дрібносерійний тип виробництва пропонується:

- застосувати трьох координатний обробний центр з ЧПК вертикального компонування з можливістю доукомплектування двох поворотним столом, що важливо для оброблення широкої номенклатури у дрібносерійному виробництві;
- змінити схему розташування заготовки під час оброблення;
- розробити спеціальний верстатний пристрій пневматичної дії з надійним розташуванням оброблюваної заготовки в ньому.



## РОЗДІЛ 2 УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ

### 2.1 Складання варіантів технологічних маршрутів та вибір оптимального

Якість виготовлення деталі значною мірою залежить від правильного встановлення та закріплення заготовки на верстаті. Встановлення включає базування, яке забезпечує орієнтацію заготовки щодо виконавчих органів верстата, інструменту або траєкторії його руху, а також закріплення, що передбачає фіксацію положення заготовки за допомогою прикладення сил.

Базові поверхні повинні мати достатні розміри, правильну геометричну форму, низьку шорсткість і бути розташовані близько до оброблюваної поверхні. Вони мають забезпечувати жорсткість та сталість базування, а також сприяти зручному закріпленню.

Для вибору оптимального методу обробки буде розглянуто кілька технологічних маршрутів, щоб забезпечити максимальну ефективність виробничого процесу.

Маршрут №1:

005 Заготівельна. Штамповка заготовки

010 Термічна обробка

015 Токарна чорнова

020 Свердлильна

025 Токарна чистова

030 Шліфувальна

035 Свердлильна

040 Слюсарна

Маршрут №2:

005 Заготівельна. Штамповка заготовки

010 Термічна обробка

015 Токарна чорнова

020 Токарна чистова

025 Свердлильна

030 Шліфувальна

035 Слюсарна

Маршрут №3:

005 Заготівельна. Ковка заготовки

010 Термічна обробка

015 Токарна чорнова

020 Свердлильна

025 Свердлильна

030 Шліфувальна

035 Токарна чистова

040 Слюсарна

Маршрут №2 є оптимальнішим, оскільки в маршрутах №1 та №3 виконання попередніх свердлильних операцій створює ризик ударної обробки на наступних етапах, таких як токарна чистова та шліфувальна. Це може спричинити поломку інструменту та виникнення дефектів на оброблюваних поверхнях, що є небажаним для забезпечення якості деталей.

## **2.2 Обґрунтування способу отримання, розрахунок та формулювання технічних вимог на виготовлення первинної заготовки**

Вибір технологічного процесу для отримання заготовки значно впливає на кількість витраченого матеріалу, якість і трудомісткість подальшої механічної обробки під час виготовлення деталі. Оптимальний процес обирається шляхом аналізу та порівняння можливих варіантів з урахуванням таких факторів, як вартість заготовки, тип виробництва, маса деталі, складність її форми та вимоги креслення.

Оцінка економічної ефективності нових технологій і вибір найбільш доцільного методу здійснюється за допомогою аналізу техніко-економічних показників.

Головна мета – наблизити форму і розміри заготовки до форми готової деталі, що дозволяє скоротити витрати матеріалів і зменшити обсяг механічного оброблення.

Сучасні тенденції у машинобудуванні спрямовані на скорочення матеріальних витрат, оптимізацію допусків і зменшення трудомісткості. Це призводить до активного використання верстатів із числовим програмним керуванням (ЧПК), автоматичних верстатів і ліній.

Остаточний вибір методу отримання заготовки здійснюється шляхом порівняння собівартості виробництва, яка включає вартість заготовки та механічного оброблення. Таким чином, раціональний підхід до вибору методу забезпечує зниження собівартості виробу, ефективне використання матеріалів і ресурсів та впровадження сучасних виробничих технологій.

У заводському технологічному процесі для отримання заготовки використовується прокат ( $\emptyset 180$ , L80,  $m = 10$  кг). Основна перевага цього методу – низька вартість. Заготовки з прокату, виготовлені зі сталі або кольорових металів, доступні у різноманітних формах (круг, квадрат, шестигранник тощо) та широко застосовуються завдяки простоті й дешевизні. Проте, коефіцієнт використання матеріалу для такої заготовки є низьким і становить лише 0,286.

Для техніко-економічного аналізу розглянемо заготовку, форма якої максимально наближена до готової деталі з врахуванням зовнішніх та внутрішніх ступенів. Розрахунок собівартості заготовки прокату здійснюється за відповідною формулою:

$$S_{\text{заг}} = (S_M * M_3 * K_c * K_B * K_M * K_{\Pi}) - (M_3 - M_D) * S_{\text{відх}} \quad (1.3)$$

де  $S_M$  – базова вартість 1 кг заготівки,  $S_M = 126$  грн/кг;

$S_{\text{відх}}$  – вартість відходів,  $S_{\text{відх}} = 8,2$  грн/кг;

$K_T$  – коефіцієнт, що залежить від точності;  $K_T = 1,0$ ;

$K_c$  – коефіцієнт, що залежить від групи складності  $K_c = 0,84$ ;

$K_B$  – коефіцієнт, що залежить від марки матеріалу  $K_B = 1,14$ ;

$K_M$  – коефіцієнт, що залежить від маси заготівки,  $K_M = 0,79$ ;

$K_p$  – коефіцієнт, що залежить від об'єму виробництва заготовки,  $K_p=1,0$ ;

Таким чином,

$$S_{\text{заг}} = (126 * 10 * 1 * 0,84 * 1,14 * 0,79 * 1) - (10 - 2,86) * 8,2 = 894,65 \text{ грн.}$$

Враховуючи тип деталі її матеріал, масу і собівартість, більш доцільним способом отримання заготовки є штампування на КГШП.

На КГШП штампуються поковки складної конфігурації масою до 100 кг. Умова деформування відрізняється від умови деформування на молотах. Це пояснюється різною швидкістю деформування, яка на молотах становить 5-8 м/с, а на пресах 0,5÷0,6 м/с, тому і процес заповнення порожнини штампа металом на пресах відбувається менш інтенсивно, ніж на молотах. На молотах порожнину струмка заповнюється металом за кілька ударів, а на пресі – за один хід повзуна. Це вимагає більш ретельного фасонування заготовки при штампуванні складних поковок.

Точність штампування на КГШП вище, ніж на молоті, що пояснюється відсутністю ударного навантаження, точний напрям половин штампа внаслідок наявності напрямних елементів, а також фіксованим положенням верхньої частини штампа в нижній мертвій точці та жорсткою конструкцією станини.

Наявність у пресів виштовхувачів дозволяє:

- зменшити штампувальні ухили;
- застосовувати закриті штампування;
- застосовувати штампування видавлюванням.

При штампуванні на КГШП у відкритих штампах в нижній мертвій точці вони не стикаються між собою і між ними існує зазор. У зв'язку з цим немає дзеркала штампа, а зазор виконують внаслідок товщини облойної канавки.

Визначаємо собівартість заготовки КГШП штампування за формулою, де:

де  $S_m$  – базова вартість 1 кг заготовки,  $S_m = 247$  грн/кг;

$S_{\text{відх}}$  – вартість відходів,  $S_{\text{відх}} = 8,2$  грн/кг;

$K_t$  – коефіцієнт, що залежить від точності;  $K_t = 1,0$ ;

$K_c$  – коефіцієнт, що залежить від групи складності  $K_c = 0,84$ ;

$K_v$  – коефіцієнт, що залежить від марки матеріалу  $K_v = 1,14$ ;

$K_m$  – коефіцієнт, що залежить від маси заготовки,  $K_m = 0,79$ ;

$K_p$  – коефіцієнт, що залежить від об'єму виробництва заготовки,  $K_p = 1,0$ ;

$$S_{\text{заг}} = (247 * 4,57 * 1 * 0,84 * 1,14 * 0,79 * 1) - (4,57 - 2,86) * 8,2 = 839,91 \text{ грн.}$$

Отже, порівнюючи вартість отримання заготовки, обираємо з економічної точки зору отримання заготовки на КГШП за ГОСТ 7505-89, так як цим способом ми отримаємо більш дешевшу, ущільнену та зміцнену заготовку. Ескіз заготовки наведено на рис. 5.1.

Призначаємо технічні вимоги на виготовлення заготовки:

1. Поковка Гр. III НВ 223...262 ГОСТ 25054-81.
2. Поковка штампована на КГШП ГОСТ 7505-89.
3. Клас точності – Т4, група сталі – М2, ступінь складності – С2, вихідний індекс – 16.
4. Незазначені радіуси закруглень – R 5...6 мм.
5. Незазначені ухили  $2 \div 3^\circ$ .
6. Допустима величина зміщення по поверхні роз'єму штампа - 1 мм.
7. Допустимі відхилення по зігнутості від площинності і прямолінійності не більше 0,6 мм.
8. Маркірувати номер замовлення, номер позиції ударним способом шрифтом 3...5 ГОСТ 2930 - 62.

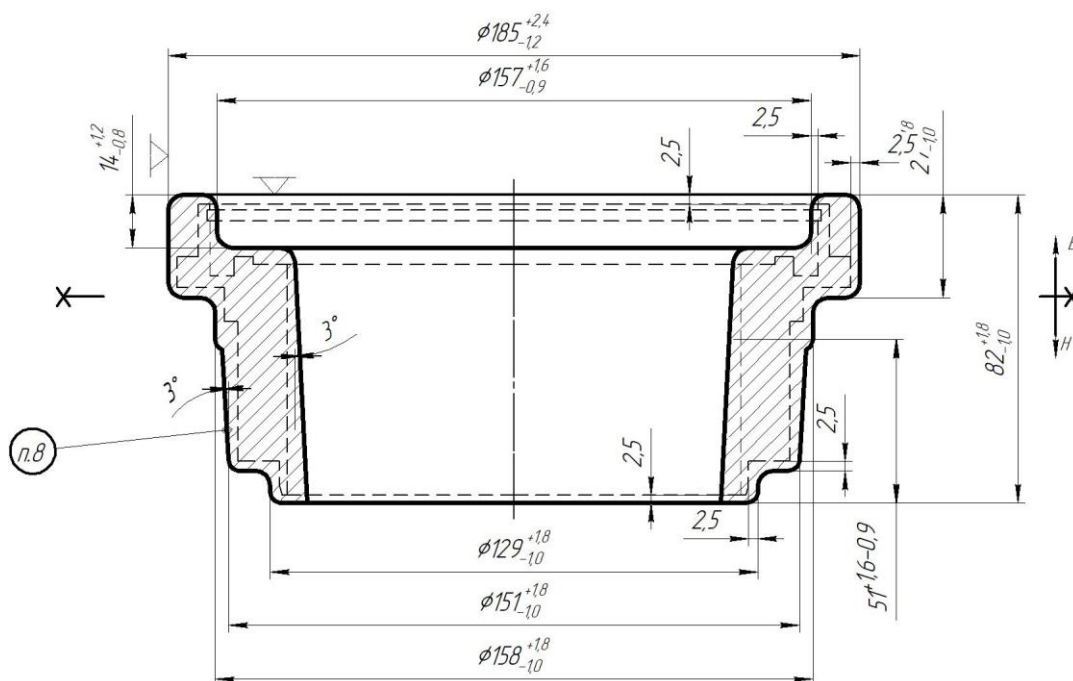


Рисунок 2.1 – Ескіз заготовки виконаної на КГШП.

### 2.3 Призначення та обґрунтування схем базування та закріплення

Для виконання цього етапу було обрано дві технологічні операції: 015 — токарну з ЧПК та 030 — свердлильну з ЧПК. Одним із ключових аспектів забезпечення точності обробки є мінімізація похибок базування, які виникають через неспівпадіння технологічної та вимірювальної баз. Щоб зменшити такі похибки, необхідно максимально суміщувати технологічні та вимірювальні бази, дотримуватись принципу сталості баз, а за потреби використовувати оброблену поверхню, яка є найбільш точною.

Для аналізу точності лінійних розмірів було розглянуто дві різні схеми базування на токарній операції з ЧПК. В обох випадках заготовка базується у трьохкулачковому патроні, що є стандартним для деталей типу втулки. Проте на другому установі обираються різні поверхні для базування, оскільки на першому використовуються чорнові бази, які визначені технологічним процесом.

У кожній схемі базування на другому установі передбачена установча база на торці та подвійна опорна база на циліндричній поверхні. Похибка базування за-

лежить від вибору цих баз і буде розрахована для установки Б з метою визначення найкращого варіанта забезпечення точності.

На цьому етапі виконується обробка деталі з двох установів, включаючи чорнове точіння поковки, яке підготовлює поверхні для подальшої чистової механічної обробки. Таким чином, оптимальний вибір схеми базування є критичним для забезпечення точності обробки та зменшення похибок.

Похибки базування, на виконавчі розміри даної операції на установі Б:

- для розміру  $14 \pm 0,2$  (варіант 1 по рис.2.2)  $\varepsilon_{\delta 14} = T_9 = 0,4 = T_{14} = 0,4$  мм – брак може виникнути;
- для розміру  $14 \pm 0,2$  (варіант 2 по рис.6.3) похибка базування буде відсутня, адже дані розміри ми обробляємо на одній операції, тобто  $\varepsilon_{\delta 14} = 0$  мм.

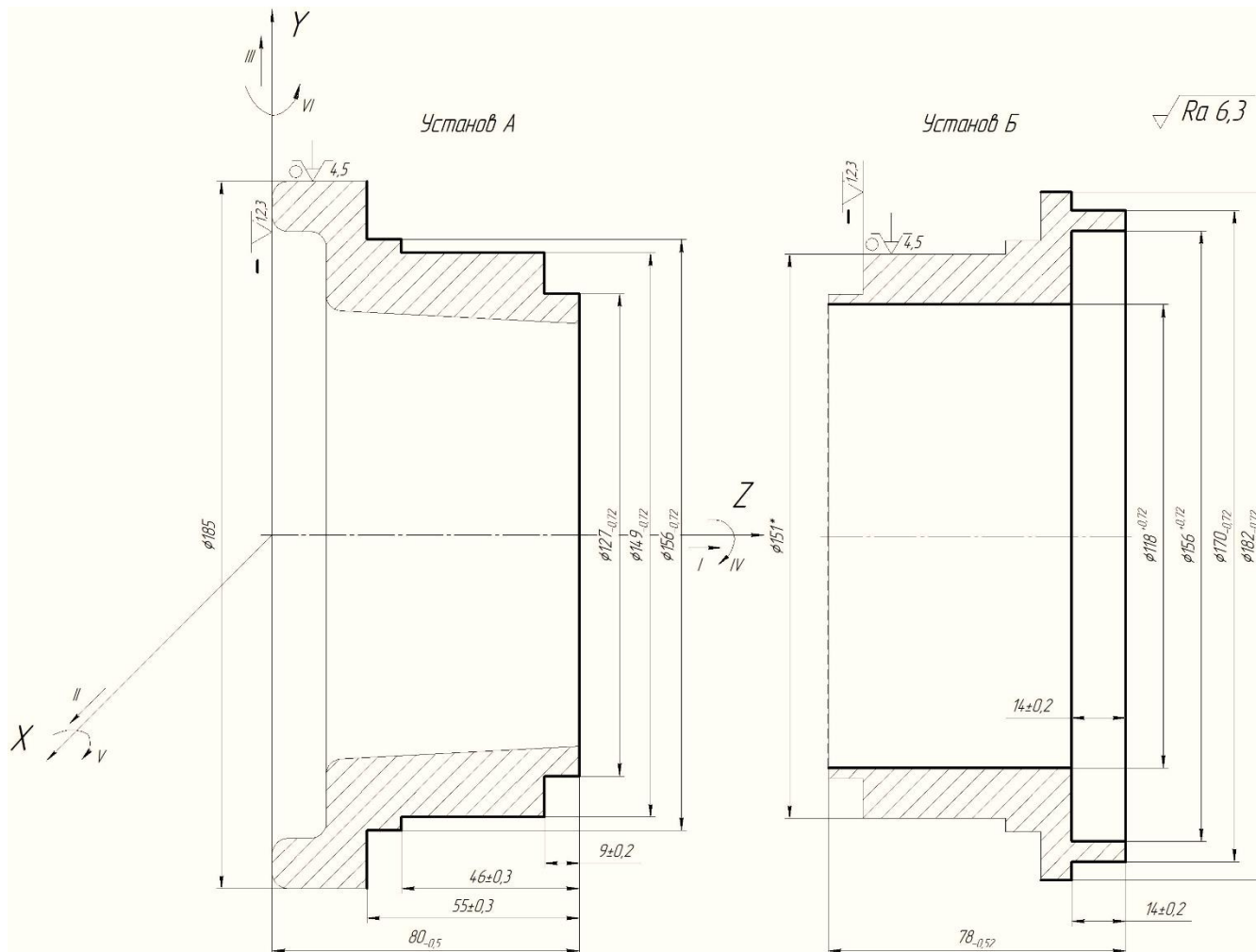


Рисунок 2.2 – Схема установки заготовки на токарній операції (варіант 1)

Таблиця 2.1 – Таблиця відповідностей

Зв'язки	Ступені вільності	Найменування бази
1,2,3	I,V,VI	УБ
5	II, III	ПОБ
-	IV	

Таблиця 2.2 – Матриця зв'язків

База		X	Y	Z
УБ	L	1	0	0
	$\alpha$	0	1	1
ПОБ	L	0	1	1
	$\alpha$	0	0	0

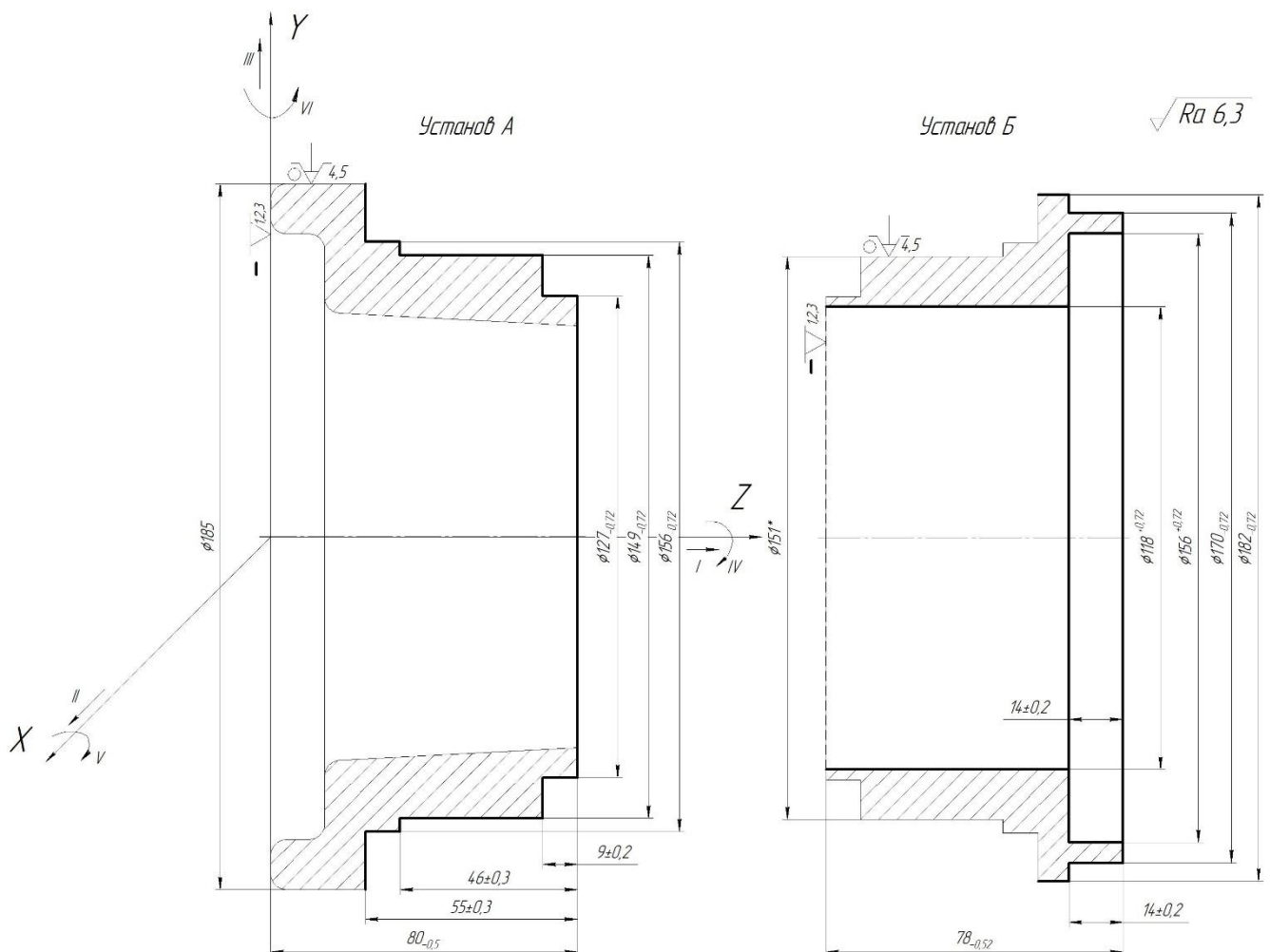


Рисунок 2.2 – Схема установки заготовки на токарній операції (варіант 2)

Отже проаналізувавши дві схеми виберемо схему базування на установі Б за варіантом 2 (рис. 2.2), тобто за зовнішню циліндричну поверхню та лівий торець.



Операція 030 – свердлильна з ЧПК.

На свердлильній з ЧПК операції відбувається свердління отворів діаметром 8,7 мм. На даній операції розглянемо дві схеми закріплення заготовки: на оправці  $\varnothing 120$  мм та з упором у різні з торців рис. 2.3, 2.4.

При цьому в обох варіантах виникають дві бази: установка на торці деталі, яка позбавляє її трьох ступенів свободи та подвійна опорна база на внутрішній циліндричній поверхні, яка позбавляє деталь двох ступенів свободи (табл. 2.1, 2.2).

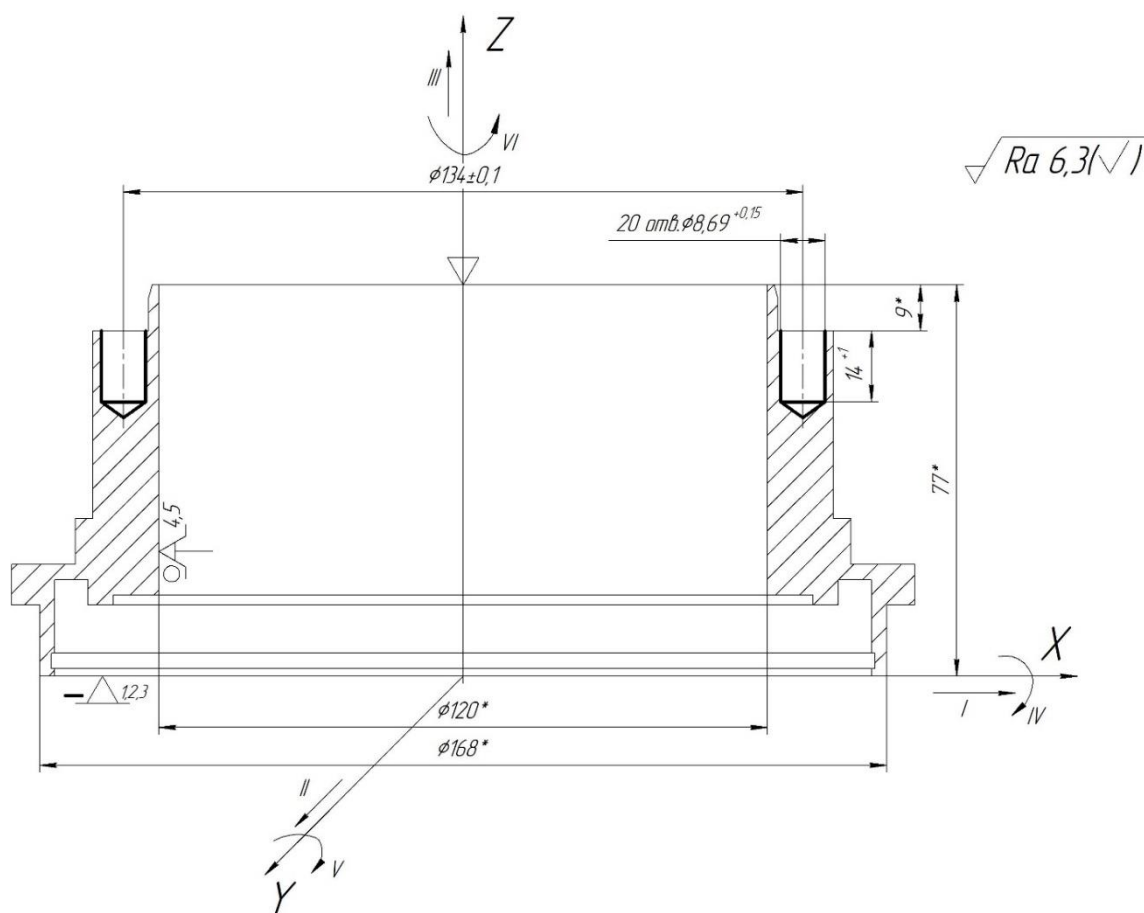


Рисунок 2.3 – Операційний ескіз операції 030 (варіант 1)

Таблиця 2.3– Таблиця відповідностей

Зв'язки	Ступені вільності	Найменування бази
1,2,3	III,IV,V	УБ
5	I, II	ПОБ
	VI	-

Таблиця 2.4 – Матриця зв'язків

База		X	Y	Z
УБ	L	0	0	1
	$\alpha$	1	1	0
ПОБ	L	1	1	0
	$\alpha$	0	0	0

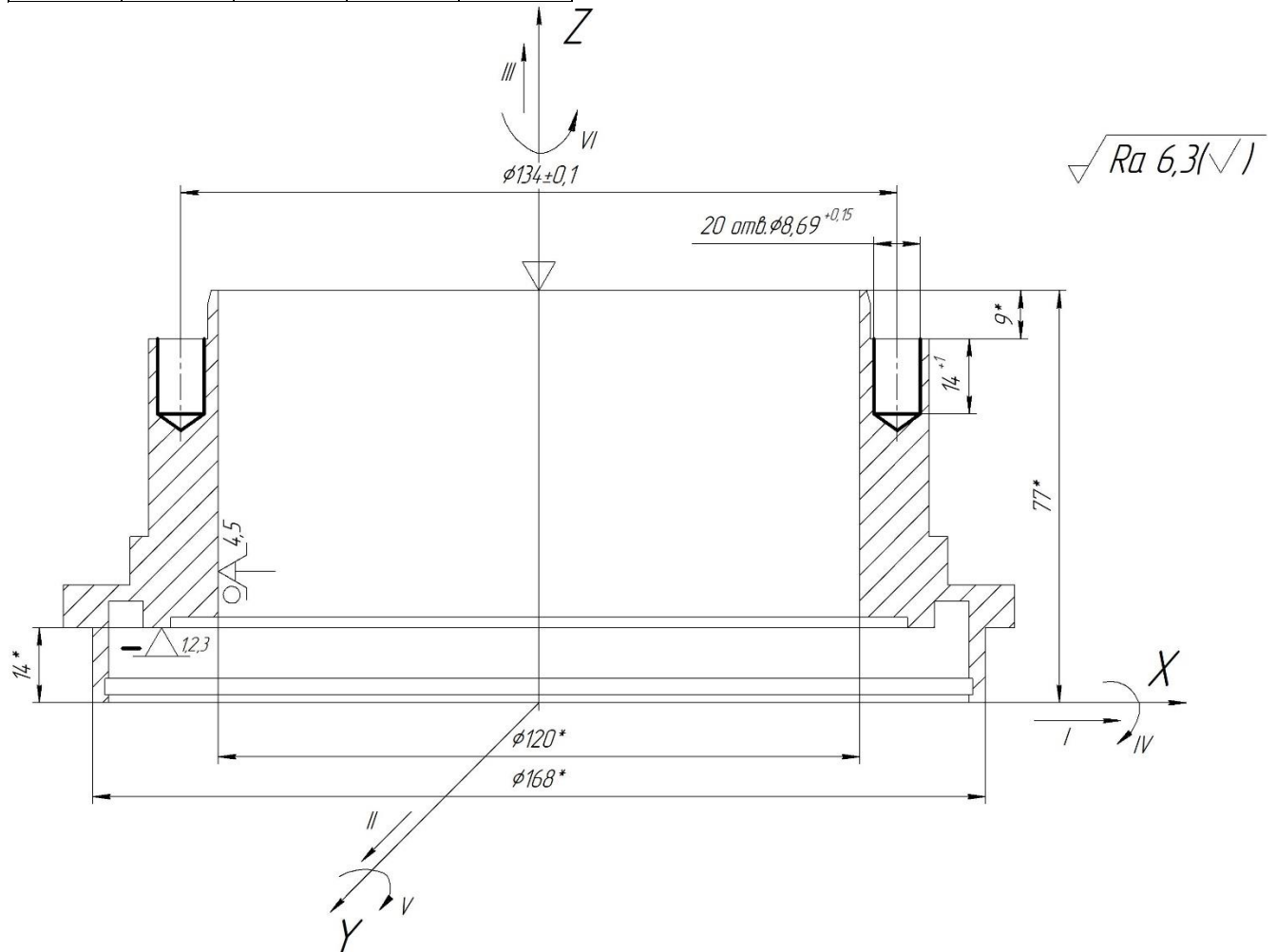


Рисунок 2.4 – Операційний ескіз операції 030 (варіант 2)

Визначимо похибки базування для двох варіантів на розмір  $14(+1;0)$  мм:

- варіант 1 по рис.2.3  $\varepsilon_{\phi 14} = T_9 + T_{77} = 0,4 + 0,3 = 0,7 < T_{14} = 1$  мм – браку нема;

- варіант 2 по рис. 2.4  $\varepsilon_{\phi 14} = T_9 + T_{77} + T_{14} = 0,4 + 0,3 + 0,4 = 1,1 > T_{14} = 1$  мм – брак може виникнути.

Виходячи з розрахунків похибки базування обираємо варіант 1, тобто схему базування за рис. 2.4.

## 2.4 Обґрунтування та вибір моделей металорізальних верстатів

Вибір металорізального верстата залежить від вимог до якості поверхні, необхідної потужності, розмірів обладнання, типу виробництва та кількості інструментів, що використовуються в операції.

Для токарної операції 015 у базовому технологічному процесі застосовується універсальний токарний верстат 1К62. Однак ми пропонуємо використовувати токарний верстат з ЧПК HAAS ST-10, який має ряд переваг:

1. Зменшення часу обробки: сучасне програмне управління забезпечує високу швидкість виконання операцій.
2. Підходить для одиничного типу виробництва: верстат ідеально відповідає умовам виробництва з невеликими серіями.
3. Оптимальні габарити: HAAS ST-10 дозволяє зручно виконувати обробку деталі завдяки своїй компактності.

Цей вибір сприятиме підвищенню ефективності виробничого процесу, скороченню трудомісткості та покращенню якості готових деталей.

Технічна характеристика верстата:

- а) найбільший діаметр оброблюваної заготовки над супортом – 200 мм;
- б) найбільший діаметр оброблюваної заготовки над станиною – 300 мм;
- в) найбільша довжина оброблюваної заготовки – 1000 мм;
- г) частота обертання шпинделя –  $1 \dots 6000 \text{ хв}^{-1}$ ;
- д) система ЧПК – FANUC;
- е) межі робочих подач (поздовжніх та поперечних): 0,01-16 мм/об;
- ж) потужність електродвигуна головного привода, кВт – 11,5;
- з) найбільша допустима сила приводу подач верстата по осям X,Z – 30000 Н;
- і) точність позиціонування по осям X, Z – 0,01 мм;
- к) маса з шафою ЧПК, кг: 2260.

Проаналізувавши технічні характеристики верстата на операції 015 токарна з ЧПК, будемо використовувати верстат моделі HAAS ST-10, тому що його технічні характеристики та технологічні можливості повністю забезпечують безперешкодну обробку деталі.

Для операції 030 – свердлильна з ЧПК пропонуємо використовувати металорізальний верстат моделі Leaderway V650 (V2516).

Верстати серії Leaderway відзначаються високою швидкістю різання, точною позиціонуванням і надійністю завдяки використанню високоякісних прецизійних механічних і електронних компонентів від провідних виробників, таких як Fanuc, Siemens, Heidenhain і Renishaw. Це забезпечує високу продуктивність і надійність обладнання при конкурентоспроможній вартості.

Верстати V-серії оснащені контролером Fanuc з інтерфейсом RS-232 і функцією Look-ahead, що дозволяє виконувати високошвидкісне фрезерування. Приводи осей XYZ також використовують компоненти Fanuc. Крім того, є можливість вибору контролера Heidenhain або Siemens, що додає гнучкості у виборі обладнання.

Базова комплектація передбачає шпиндель із максимальною швидкістю 10 000 об/хв і потужністю 11 кВт, а для спеціалізованих завдань можна встановити високошвидкісний шпиндель із частотою обертання до 12 000 або 15 000 об/хв. Для обробки глибоких отворів доступна опція використання шпинделя з подачею змащувально-охолоджувальної рідини через інструмент.

Важливим елементом конструкції є загартовані сталеві шліфовані напрямні кочення, що забезпечують плавні переміщення як у робочому, так і холостому режимах.

З огляду на технічні вимоги до обробки поверхонь у рамках даної операції, верстати Leaderway V-серії є повністю придатними для виконання заданих завдань. Потужність обладнання становить 7,5 кВт, що є достатнім для забезпечення виконання операції на високому рівні.

Габарити робочого простору цілком задовольняють умовам даної операції, а саме:

Розміри робочої поверхні столу, мм – 1200x800

Виліт шпинделя, мм – 70

Відстань від торця шпинделя до робочої поверхні столу, мм – 600

Найбільша маса оброблюваного виробу, кг – 300

Найбільше переміщення столу:

- Поздовжнє, мм – 600

- Поперечне, мм – 500

Найбільший діаметр:

свердління в сталі, мм – 35;

розсвердлювання в сталі, мм – 65;

Дискретність відліку координат по осях, мм – 0,01

Точність установки координат, мм – 0,01

Число Т-подібних пазів – 5

Ширина паза, мм – 18

Конус шпинделя – ISO 50.

Верстат також обраний відповідно до рекомендацій по вибору обладнання в дрібносерійному виробництві. Цей верстат оснащений системою з ЧПК що дозволяє робити його швидко переналадження на обробку інших деталей.

## **2.5 Обґрунтування та вибір верстатних пристроїв, різального та вимірювального інструментів**

Виходячи з типу виробництва (дрібносерійне) найбільш доцільно застосовувати систему універсально складальних пристроїв (УСП) .

Для установки і закріплення деталі на операції 015 в якості пристроїв використовуємо трьохкулачковий патрон 7102-0071-3-1 ДСТУ 24351-2010 з розточеними кулачками. Патрон з ручним приводом. Трьохкулачковий патрон був обраний, враховуючи дрібносерійний тип виробництва. У даному пристрої шляхом нескладного переналадження можуть оброблятися деталі подібні заданої (диски, фланці з  $l/d < 1$ ).

Для обробки заданих поверхонь на операції застосовуємо такі прогресивні ріжучі інструменти, взамін інструментів з напайними пластинами:

- різець прохідний упорний PCLNR2525K12 з BK8 - для точіння зовнішніх поверхонь і підрізання торців;

- різець розточний прохідний упорний S32PCLNR з BK8 – для розточування внутрішніх поверхонь і підрізання торців.

Для забезпечення ефективної обробки з високими швидкостями різання на всіх операціях використовується мастильно-охолоджуюча рідина Укрінол-1. Всі ріжучі інструменти безпосередньо встановлюються в різцетримач верстата.

Для контролю розмірів деталей на операції токарної обробки з ЧПК застосовуються штангенциркулі ШЦ-I-125-0,1 та ШЦ-II-250-0,1. Для надійної фіксації деталі на операції 030 рекомендується використовувати спеціальний пневматичний пристрій, який забезпечить стабільне зусилля затиску та підвищить жорсткість системи.

Всі оброблювані поверхні відповідають 14-му квалітету шорсткості. Для свердління отворів діаметром 8,7 мм використовується спіральне свердло зі швидкорізальної сталі Р6М5 марки SD203A-0500-020-06R1-P. Для встановлення свердла в шпиндель верстата використовується свердлильний патрон 10-B10.

Для контролю розмірів на операції 035 застосовуємо універсальний шкальний інструмент а саме штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166 – 89, яким можна проконтролювати отвори.

Застосування даних інструментів економічно обґрунтовано в дрібносерійному виробництві.

## **2.6 Розрахунок режимів різання**

Розрахунок режимів різання будемо проводити для операції 030 свердлильна з ЧПК.

Операція 030 Свердлильна з ЧПК.

Перехід 1 – свердлити 20 отв. Ø8,7H14 на глибину  $14 \pm 0,215$  мм, з дотриманням розмірів  $\text{Ø}134 \pm 0,1$  мм;

Оброблювана поверхня – глухий отвір Ø8,7H14, глибина отвору – 14 мм.

Оброблюваний матеріал – сталь 08X18H10T.

Матеріал інструменту – Р6М5.

Вид заготовки – поковка після точіння.

Відповідно до методики [5] маємо.

1. Глибина різання –  $t = 0,5D = 0,5 \cdot 8,7 = 4,35$  мм.

2. Подача на оберт –  $S_o = 0,15$  мм/об [5].

3. Період стійкості свердла –  $T = 30$  хв. [5].

Розраховуємо швидкість різання за емпіричною формулою згідно [5], м/хв:

$$V = \frac{C_v D^q}{T^{m_s} y} \cdot K_v, \quad (2.1)$$

де  $T$  – середнє значення періоду стійкості інструменту, хв; згідно [5]:

$$T = 240 \text{ хв.}$$

Коефіцієнти для даної формули рівні згідно [5]:  $C_v = 3,5$ ,  $q = 0,5$ ,  $y = 0,45$ ,  $m = 0,12$ .

$K_v$  – загальний поправочний коефіцієнт що враховує якість оброблюваного матеріалу і визначається за формулою:

$$K_v = K_{MV} K_{ПV} K_{IV}, \quad (2.2)$$

де  $K_{mv}$  – коефіцієнт що враховує якість оброблюваного матеріалу і визначається за формулою згідно [5]:

$$K_{MV} = K_{\Gamma} \left( \frac{750}{\sigma_b} \right)^{n_v}, \quad (2.3)$$

де  $\sigma_b = 685$  МПа – межа міцності оброблюваного матеріалу, сталь 40ХН2МА;

$K_{\Gamma}$  – характеризує групу стали по оброблюваності,  $K_{\Gamma} = 0,95$ , сталь хромиста;

$n_v$  – показник ступеня,  $n_v = 1$ .

Отже:

$$K_{MV} = 0,95 \cdot \left( \frac{750}{685} \right)^{1,0} = 0,94;$$

$K_{ПV}$  – враховує стан поверхні заготовки,  $K_{ПV} = 1,0$  [5];

$K_{IV}$  – враховує матеріал інструменту Р6М5,  $K_{IV} = 0,8$ , [5].

Таким чином:

$$K_v = 0,94 \cdot 1,0 \cdot 0,8 = 0,75.$$

Визначаємо швидкість різання:

$$V = \frac{3,5 \cdot 8,7^{0,5}}{30^{0,12} \cdot 0,2^{0,45}} \cdot 0,8 = 11,3 \text{ м/хв.}$$

Визначаємо частоту обертання шпинделя за формулою, об / хв:

$$n_p = \frac{1000V}{\pi D} \quad (2.4)$$

$$n_p = \frac{1000 \cdot 11,3}{\pi \cdot 8,7} = 413,7 \text{ об/хв.}$$

Враховуючи безступінчасте регулювання частот обертання шпинделя, остаточно приймаємо  $n_{\text{пр}} = 414$  об/хв:

Визначимо хвилинну подачу по формулі, мм / хв:

$$S_m = S_o n. \quad (2.5)$$

$$S_m = 0,15 \cdot 414 = 62,1 \text{ мм/хв.}$$

Визначаємо крутний момент на шпинделі за формулою [5], Нм:

$$M_{\text{кр}} = 10 C_m D q s y K_{\text{кр}} \quad (2.6)$$

де  $C_m = 0,041$ ,  $q = 2,0$ ,  $y = 0,7$  – коефіцієнти та показники в формулі [5];

$K_{\text{кр}}$  – поправочний коефіцієнт враховуючий вплив оброблюємого матеріалу [5];

$$K_{\text{кр}} = \left( \frac{\sigma_B}{750} \right)^n$$

де  $n = 0,75$  – показник ступені [9].

$$K_{\text{кр}} = \left( \frac{490}{750} \right)^{0,75} = 0,73.$$

З урахуванням поправочних коефіцієнтів маємо:



$$M_{кр} = 10 \cdot 0,041 \cdot 8,7^2 \cdot 0,2^{0,7} \cdot 0,73 = 7,3 \text{ Нм.}$$

Визначаємо ефективну потужність різання за формулою [5], кВт:

$$N_e = \frac{M_{кр} V}{9750}. \quad (2.7)$$

$$N_e = \frac{7,3 \cdot 413,7}{9750} = 0,31 \text{ кВт.}$$

Для можливості реалізації різання на верстаті повинно виконуватися умова:

$$N_p < N_d \cdot \eta, \quad (2.8)$$

де  $N_d$  - потужність двигунів верстата, 10 кВт;

$\eta$  - коефіцієнт корисної дії верстата, 0,75.

Перевіряємо умову:

$$N_d \cdot \eta = 10 \cdot 0,75 = 7,5 \text{ кВт.}$$

Основний час роботи верстата на переході визначаємо за формулою, хв:

$$T_o = \frac{L}{S_m} i, \quad (2.9)$$

де  $L$  – довжина шляху інструменту, що враховує довжину врізання;

$S_m$  – хвилинна подача, мм/хв;

$i$  – кількість проходів.

Тоді:

$$T_o = \frac{14+2}{62,1} \cdot 20 = 5,15 \text{ хв.}$$

Результати розрахунку режимів різання наведені в таблиці 2.8.

Таблиця 2.3 – Режими обробки на переходи операції 030

Номер і текст переходу	Параметр режимів обробки					L, мм	T <sub>о</sub> , хв
	t, мм	S, мм/хв	n, об/хв	V, м/хв	i		
Свердлити 20 отворів	4,35	62,1	414	11,3	20	16	5,15

Дані про режими різання беремо з попереднього пункту.

Основний час на операції складається з сум основних часів на окремих переходах.

Дані щодо режимів різання та основного часу обираємо з табл. 2.3.

Основний час  $T_o = 5,15$  хв.

Визначаємо допоміжний час за формулою 2.9, де:

$$T_{вст} = 1,54 \text{ хв}, \quad T_{кв} = 1,18 \text{ хв}, \quad T_{вим} = 0,95 \text{ хв} [13].$$

$$T_d = 1,54 + 1,18 + 0,95 = 3,67 \text{ хв}$$

Сума основного і допоміжного часу становить час оперативної роботи  $T_{оп}$  за формулою:

$$T_{оп} = 5,15 + 3,67 = 8,82 \text{ хв}$$

Визначаємо додатковий час за формулою:

$$T_{дод} = 8,82 \cdot 0,08 = 0,71 \text{ хв}$$

Розраховуємо штучний час за формулою:

$$T_{шт} = 8,82 + 0,71 = 9,53 \text{ хв}$$

Розраховуємо штучно-калькуляційний час за формулою:

$$T_{шк-к} = T_{шт} + \frac{T_{п-з}}{N}$$

де  $T_{п-з}$  – підготовчо-заключний час, що складається з часу:

- 1) на отримання креслення і наряду,  $T = 6$  хв;
- 2) на ознайомлення з роботою та кресленням,  $T = 2$  хв;
- 3) на інструктаж майстра,  $T = 2$  хв;

4) на отримання інструменту, верстатного пристрою та заготовки  $T = 8$  хв.

$$T_{п-з} = 6+2+2+8=18 \text{ хв}$$

$N = 95$  шт. – кількість деталей у партії

$$T_{шк-к} = 9,53 + \frac{18}{95} = 9,72 \text{ хв.}$$

## 2.7 Проектування засобів технологічного оснащення

В магістерській роботі розробляється пристрій для обробки деталі – «Обойма» на свердлильну операцію.

В проєкті розробляється пристрій для обробки деталі – «Обойма» на операції 030 – свердлильна з ЧПК.

В даний час заготовка обробляється на універсальному обладнанні з ручним зажимом прихватами. Застосування спеціального пристрою з механізованим приводом дозволить знизити трудомісткість, підвищити якість параметрів операції.

На даній операції повинні формуватися такі розміри: 20 отворів  $\varnothing 8,7$  мм на глибину 14 мм.

Отвори  $\varnothing 8,7$  мм є вільними розміром, а значить відповідно до технічних вимог на виготовленні деталі, допуск беремо по 14 квалітету точності [10].

$$T_{\varnothing 50} = 620 \text{ мкм}$$

Точність лінійних розмірів вказана 14 (+1;0) мм, отже

$$T_{14} = 1000 \text{ мкм}$$

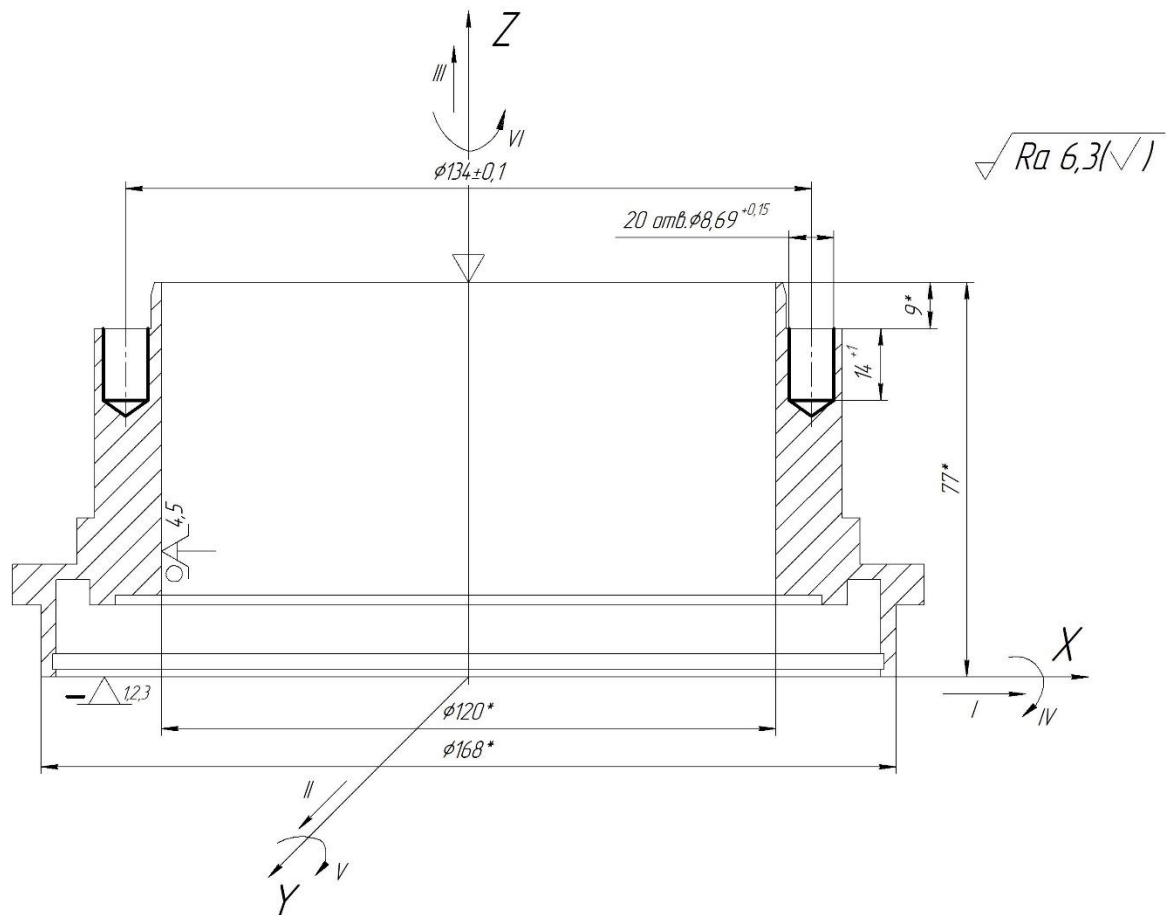


Рисунок 2.3 – Схема базування заготовки на свердлильній з ЧПК операції

Шорсткість оброблюваних поверхонь.

Шорсткість оброблюваних поверхонь, яка вказана на кресленні, має значення 6,3 мкм за критерієм Ra.

Аналіз базових поверхонь.

Конструкція пристрою буде припускати базування заготовки по торцю і по внутрішній циліндричній поверхні  $\phi 120H7$ .

Згідно креслення отвір  $\phi 120$  обробляється по IT7. Згідно [10] знаходимо значення допуску:  $T \phi 120 = 30$  мкм.

Це означає, що діаметр отвору виконаний з параметрами  $\phi 120H7 (+0,03; 0)$ . Довжина отвору 64 мм. Відношення  $l/d < 1$ , що свідчить про можливість використання отвори як подвійної опорної бази.

Шорсткість базових поверхонь.

Шорсткість поверхні, зазначена на кресленні для діаметра  $\varnothing 120H7$  та торцю відповідає за критерієм Ra 1,6 мкм, що є достатнім досягнення необхідної точності на даній операції.

У проєктованому пристрої планується обробляти заготовки з базовими поверхнями саме такими або в межах  $\pm 10$  мм розмірів з вказаними параметрами точності. Іншими словами, адаптивні властивості настановних елементів пристосування повинні знаходитися в межах допусків зазначених розмірів.

Визначення умов в яких буде виготовлятися і експлуатуватися проєктоване пристосування.

Річна програма випуску визначена в 1000 деталей. Така програма з урахуванням трудомісткості передбачає дрібносерійний тип виробництва. Але проєктування даного пристрою проводиться в навчальних цілях.

Заготовка буде оброблятися на багатоцільовому верстаті Leaderway V650 з системою ЧПК.

Обробка на даній операції здійснюється свердлом  $\varnothing 8,7$  мм. Пристрій має обслуговуватися верстатником 3-го розряду.

Складання переліку реалізованих функцій.

0. Переміщення і попередня орієнтація заготовки.

1. Базування заготовки.

2. Закріплення заготовки.

3. Базування пристрою на верстаті.

4. Закріплення пристрою на верстаті.

5. Підведення і відведення енергоносія.

6. Освіта вихідної сили для закріплення.

7. Управління енергоносієм.

8. Об'єднання функціональних вузлів (корпус).

9. Обробка поверхонь згідно ескізу.

10. Створення безпечних умов праці.

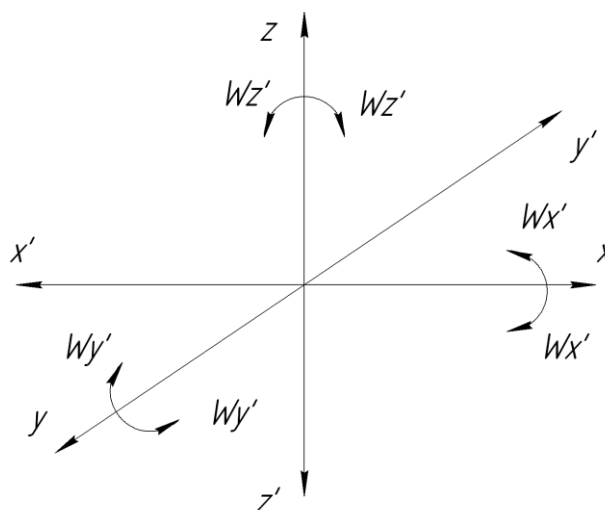


Рисунок 2.4 – Система координат

На заготовку накладено 11 односторонніх зв'язків, причому усі повні, що обумовлено відсутністю зазору між деталлю і пристроєм.

Щоб система стала врівноваженою під час обробки, необхідно позбавити заготовку можливості переміщатися по координаті Z.

Побудова функціональної структури і загальної компоновки пристрою.

З набору функцій, наведених вище, виділимо ті, які реалізуються в перебігу оперативного часу: 0,1,2,5,6,7. 3,4 Функції впливають на підготовчо-заклучний час; 9 функція прямого впливу на штучний час не робить.

Таблиця 2.4 – Таблиця односторонніх зв'язків

Індекс зв'язку		X	X'	Y	Y'	Z	Z'	$\omega_x$	$\omega_x'$	$\omega_y$	$\omega_y'$	$\omega_z$	$\omega_z'$
Сло сіб реалізації	Ре акція	R	R	R	R	-	R	R	R	R	R	R	R

Керуючись нормативами часу, складемо структуру потоку функцій при їх послідовній реалізації. Послідовна структура реалізації потоку функцій є найбільш тривалою за часом, проте в даному випадку це єдина можливість обробки заготовки на даній операції при дрібносерійному типі виробництва, де обробка ведеться по можливості стандартним ріжучим інструментом і суміщення

переходів не представляється можливим. Функціональна структура проектованого пристосування представлена на рис. 7.3.

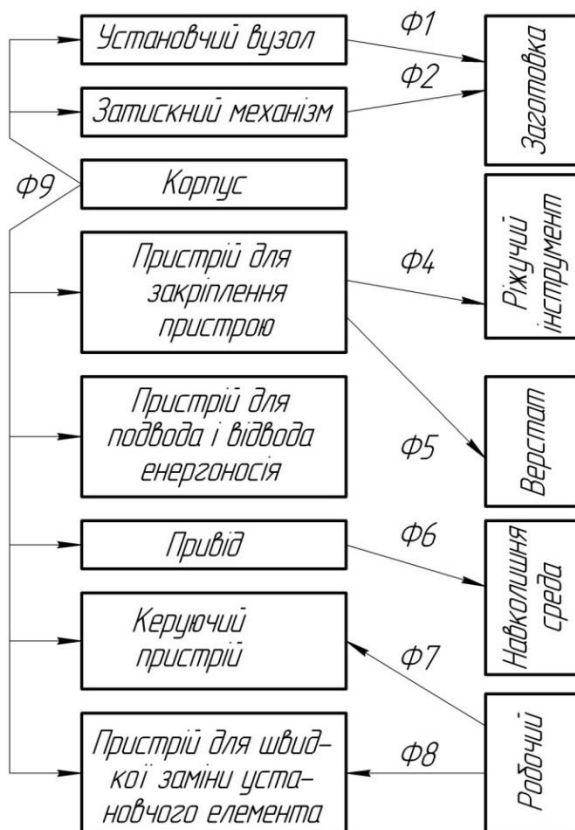


Рисунок 2.5 – Функціональна структура проектованого пристрою

Розробка і обґрунтування схеми закріплення. Аналіз взаємодії силових полів з позицій рівноваженості системи: ріжучий інструмент - заготовка - пристрій – верстат.

Розрахунок сил закріплення

Розрахуємо коефіцієнт запасу за формулою з [12]:

$$K = K_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6, \quad (2.10)$$

де  $k_0$  – коефіцієнт гарантованого запасу ( $k_0 = 1,5$ );

$k_1$  – коефіцієнт враховує збільшення сил різання через випадкові нерівності на оброблюваних поверхнях ( $k_1 = 1,1$ );

$k_2$  – коефіцієнт що характеризує збільшення сил різання внаслідок затуплення ріжучого інструменту ( $k_2 = 1,7$ );

$k_3$  – коефіцієнт враховує збільшення сил різання при переривчастому різанні ( $k_3 = 1$ );

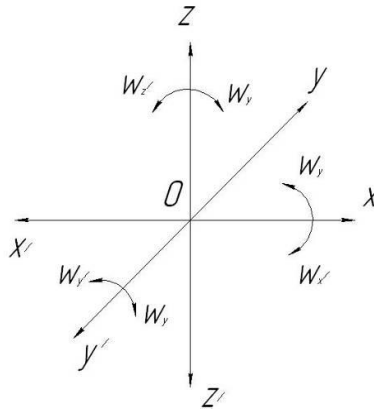
$k_4$  – коефіцієнт що характеризує сталість сили закріплення зажимного механізму ( $k_4 = 1,2$ );

$k_5$  – коефіцієнт що характеризує ергономіку ручних ЗМ ( $k_5 = 1$ );

$k_6$  – коефіцієнт враховує наявність моментів, що прагнуть повернути заготовку;

За формулою 7.1:

$$K = 1,5 \times 1,1 \times 1,7 \times 1,0 \times 1,2 \times 1,1 = 3,366.$$



Індекс зв'язку		$x$	$x'$	$y$	$y'$	$z$	$z'$	$\omega_x$	$\omega'_x$	$\omega_y$	$\omega'_y$	$\omega_z$	$\omega'_z$
Спосіб Реаліза- ції	Реакція			R	R		R	R	R	R	R	R	R
	Сила закріплення					W							
	Сила тертя	F(W)	F(W)										

Виходячи з того, що найбільша сила та крутний момент будуть виникати при свердлінні отвору  $\varnothing 8,7$  мм розрахунок сили затиску будемо проводити саме по критерію величини сил та моментів, що виникають при обробці даної поверхні. Осьова сила  $P_o$  при цьому буде діяти радіально на центральну оправку, на якій базується деталь, тому в розрахунках її можна не враховувати.

З попередніх розрахунків  $M_{кр} = 7,3$  Нм, тобто визначимо силу  $P_z$ , що буде намагатися опрокинути заготовку.

$$P_z = 2M_{кр}/D_{св} \quad (2.11)$$



де  $D_{св}=8,7$  мм- діаметр свердла.

$$P_z = 2 \cdot 7,3 / 0,0087 = 192 \text{ Н}$$

Складемо рівняння моментів сил і визначимо силу закріплення  $W$ .

Сили тертя  $F_{тр1}$  і  $F_{тр2}$  будуть діяти на середньому діаметрі опорних площин.

Запишемо умову  $M_{тр} > M$

Представимо

$$M_{тр} = K \cdot l \cdot P_z \quad (2.12)$$

$$F_{мп1} \times \left(\frac{R_1}{2}\right) + F_{мп2} \times \left(\frac{R_2}{2}\right) = K \times l \times P_z \quad (2.13)$$

$$W \times f_1 \left(\frac{R_1}{2}\right) + W \times f_2 \times \left(\frac{R_2}{2}\right) = K \times l \times P_z \quad (2.14)$$

$$R_1 = \frac{D_{ш} + D_o}{2} = \frac{126 + 120}{2} = 123 \text{ мм},$$

де  $D_{ш}$  – зовнішній діаметр шайби

$R_2 = (168 + 156) / 2 = 162$  мм, де 168 і 156 – розміри, що характеризують опорний торець деталі.

$$l = 134 / 2 = 67 \text{ мм}$$

$f_1 = f_2 = 0,25$  – коефіцієнти тертя по площинах шайби - деталь і деталь-торець пристосування відповідно.

Виразимо силу закріплення  $W$

$$W = \frac{K \times l \times P_z}{f \times ((R_1 + R_2) / 2)} = \frac{3,366 \times 67 \times 192}{0,25 \times (123 + 162) / 2} = 3024 \text{ Н}.$$

Обґрунтування вибору приводу.

Для розкріплення досить ходу 5-10 мм, отже, раціонально вибрати тарілчасту гумовотканинну пневмокамеру однобічної дії з діаметром діафрагми визначається за формулою [12]:

$$D = 1,13 \sqrt{\frac{W}{p}} = 1,13 \times \sqrt{\frac{3024}{0,4}} = 157,3 \text{ мм} \quad (2.15)$$

де  $p = 0,4$  МПа – тиск повітря в мережі.

Приймаємо по ДСТУ найближчий більший діаметр  $D = 160$  мм.

Отже розраховуємо фактична силу закріплення при діаметрі пневмокамери 160 мм по ДСТУ.

$$W_{\phi} = \frac{D^2 \times p}{1,13^2} = \frac{160^2 \times 0,4}{1,13^2} = 3080 \text{ Н}$$

Точнісіні розрахунки пристрою.

З інформаційної точки зору розрахунки допусків на виготовлення елементів пристосування являють собою перетворення інформації про обробки поверхонь деталі на даній операції в точнісіні до пристрою.

Перш ніж приступити до розрахунку точності, визначимо розрахункові параметри, які більшою мірою впливають на досягнення заданих допусків обробляє деталі. При обробці заданої деталі на операції до розрахунковим параметрам слід віднести найбільш жостким допуском на кресленні  $\epsilon 134 \pm 0,2$  мм.

Деталь базується на даній операції по поверхні  $\text{Ø}120\text{H}7$  \*тобто можна говорити про те що технологічна та вимірювальна бази збігаються.

Визначимо допустиму похибку на паралельність верхнього торця стакану до настановчої поверхні плити за формулою [12]:

$$\epsilon_{np} = T - K_T \cdot \sqrt{(K_{T1} \cdot \epsilon_{\phi})^2 + \epsilon_z^2 + \epsilon_y^2 + \epsilon_n^2 + \epsilon_u^2 + (K_{T2} \cdot \omega)^2 + \epsilon_{noz}^2}, \quad (2.16)$$

де  $T$  – допуск розміру  $T = 0,4 \text{ мм} = 400 \text{ мкм}$ ;

$K_T$  – коефіцієнт, що враховує можливе відступ від нормального розподілу окремих складових, приймаємо  $K_T = 1,2$ ;

$K_{T1}$  – коефіцієнт, який враховує деяке зменшення граничного значення похибки базування, що приймається до уваги, коли похибки базування не дорівнюють нулю, в даному випадку  $K_{T1} = 0,85$ ;

$\varepsilon_{\delta}$  – похибка базування заготовки, яка в даному випадку буде дорівнює максимальному зазору між оправленням і отвором деталі.

$$\varepsilon_{\delta} = S_{\max} = 120,03 - 119,98 = 0,05 \text{ мм} = 50 \text{ мкм.}$$

$\varepsilon_3$  – похибка закріплення заготовки, тому привід механізований і похибка закріплення буде постійною, то враховуємо її один раз при налаштуванні верстата, приймаємо  $= 0$ ;

$\varepsilon_y$  – похибка установки пристосування на верстаті, враховує зазори між установочними елементами пристосування і посадочними елементами верстата (шпонками). Пристосування встановлюється на стіл за двома шпонками по посадці 18H9 / h9. Але величина зазору на похибку отримуваних розмірів не впливає, так як вони вимірюються в різних напрямках.

$\varepsilon_n$  – похибка перекосу інструменту. Обробка вестиметься спіральними свердлами відповідного діаметру, але перед цим отвори необхідно зацентрувати центрувальним свердлом, щоб виключити (або принаймні мінімізувати відведення свердла). Тобто похибка перекоса  $= 0$ .

$\varepsilon_u$  – похибка, що виникає внаслідок зносу настановних елементів пристосування. Величина зносу залежить від програми випуску деталей і форму настановної поверхні.

Похибка зносу настановних елементів пристосування визначаємо за формулою :

$$\varepsilon_u = \beta_2 \cdot N, \quad (2.17)$$

де  $\beta_2 = 0,001$  – постійний коефіцієнт, узятий за рекомендаціями [9];

$N$  – число контактів заготовки з опорою. Річний випуск деталей = 1000 шт. Пристосування передбачається експлуатувати без ремонту і заміни деяких настановних елементів 2 роки, тому

$$N = N_f \cdot n = 1000 \cdot 2 = 2000 \text{ штук.}$$

$$\varepsilon_u = 0,001 \cdot 2000 = 0,1 \text{ мм} = 100 \text{ мкм.}$$

$K_{T2}$  – коефіцієнт, що враховує ймовірність появи похибки обробки, приймаємо за рекомендаціями [12]  $K_{T2} = 0,6$ ;

$w$  – середня економічна точність обробки, по [12] при свердлінні отворів середня економічна точність – 12 квалітет. Отже в розрахунках приймаємо допуск на найбільший діаметр оброблюваного отвору по 12-му квалітету тобто для отвори  $\varnothing 8,7H12$   $w = 80$  мкм;

$\varepsilon_{noz}$  – Похибка позиціонування верстата. З паспорта верстата Leaderway V650, на якому буде проводиться обробка = 10 мкм.

Виконуємо розрахунок допустимої похибки пристрою, яку не можна перевищити при виготовленні його деталей і їх складанні.

$$\varepsilon_{np} = 400 - 1,2 \cdot \sqrt{(0,85 \cdot 50)^2 + 0^2 + 0^2 + 0^2 + 100^2 + (0,6 \cdot 80)^2 + 10^2} = 400 - 258 = 142 \text{ мкм}$$

За рекомендаціями [12] приймаємо найближче менше значення допуску паралельності торцевої поверхні деталі стакан до основи плити. Дана вимога, а саме паралельність двох поверхонь прийнято тому, що саме ця похибка буде надавати найбільший вплив на точність обробки, а саме витримування в заданих межах допуску.

Найближче стандартне значення допуску паралельності по [12] 120 мкм для діапазону розмірів 160-200 мм, в який входить розмір  $\varnothing 170$  – плоскості торця, відповідає 10-й ступені точності.

Отже, на кресленні пристрою проставляємо допуск паралельності торця стакану до основи плити рівний 0,12 мм.

Опис пристрою і принципу дії пристрою.

Пристосування у збірці має задовольняти технічним вимогам креслення загального вигляду і забезпечувати якісну обробку заготовки по заданих розмірах.

Пристрій складається з плити під якою змонтована пневмокамера і на якій встановлено стакан. При подачі стисненого повітря в і верхню порожнину відбувається закріплення заготовки. Подача повітря здійснюється через триходовий розподільний кран. При відключенні подачі повітря по-засобом перемикання триходового крана відбувається процес розкріплення заготовки за допомогою пружини (камера односторонньої дії).

Розрахунок на міцність. Розраховуємо на міцність різьблення штока. По конструктивних міркувань і попередньої компонованні пристосування приймемо різьбу на штоку М12х1,75-6g. Сила на штоку  $W = 3080$  Н, матеріал гвинта - Сталь 40 ГОСТ 1050-88.

Внутрішній діаметр різьби розраховується за формулою:

$$d_B = d_H - (0,541P) \cdot 2 \quad (2.18)$$

де  $d_H$  – зовнішній діаметр різьби;

$P$  – шаг різьби.

$$d_g = 12 - (0,541 \cdot 1,75) \cdot 2 = 10,20 \text{ мм}$$

Мінімальна площа поперечного перерізу різьби розраховується за формулою:

$$S_{min_{рез}} = \frac{\pi d_g^2}{4} \quad (2.19)$$

де  $d_B$  – внутрішній діаметр різьби.

$$S_{min_{рез}} = \frac{\pi \cdot 10,2065^2}{4} = 60,22 \text{ мм}^2$$

Межа текучості для Сталі 40 дорівнює 300 МПа.

Допустимі напруги розтягування визначається за формулою:

$$[\sigma_P] = 0,5 \cdot \sigma_T \quad (2.20)$$

Тобто

$$[\sigma_P] = 0,5 \cdot 300 = 150 \text{ МПа.}$$

Запишемо умова міцності на розтяг:

$$\sigma_P = \frac{W}{S_{\min_{\text{рез}}}} \leq [\sigma_P] \quad (2.21)$$

$$\sigma_P = \frac{8100}{60,22} = 135 < 150 \text{ МПа.}$$

Отже міцність штока забезпечується, так як міцність забезпечується навіть в його мінімальному перетині (на різьбовій ділянці).

Специфікація на верстатний пристрій наведена в додатку.

## 2.8 Висновки

Таким чином у розділі удосконалення технологічного процесу виготовлення деталі «Обойма» у якості заготовки була прийнята поковка, так як вона більш економічно вигідна за техніко-економічними розрахунками.

Під час виконання роботи було проаналізовано заводський технологічний процес виготовлення деталі та внесено зміни спрямовані на його вдосконалення, а саме змінена послідовність операцій, замінено універсальне устаткування на обладнання з ЧПК.

Для аналізу в цьому пункті обрана сверлильна операція, а саме детально розглянуто схеми базування та закріплення заготовки на операції із визначенням

похибок базування, також обраний верстат, оснащення, режим різання та виконано технічне нормування операції.

Спроектований спеціальний верстатний пристрій для свердлильної операції з пневматичним приводом, що дозволяє скоротити допоміжний час та підвищити надійність процесу.

## РОЗДІЛ 3 НАУКОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 3.1. Розроблення 3D – моделі конструкції верстатного пристрою та його інженерний аналіз

Для виконання розрахунків чисельного моделювання на першому етапі була виконана побудова 3D – моделі верстатного пристрою разом із деталлю (рис. 3.1).

Дослідження напружено-деформованого стану (НДС) виконувалось типу для визначення розмірів ВП, які будуть задовольняти всім точнісним параметрам для обробки деталі. При цьому визначались похибки при типовій обробці, що виникають у результаті деформацій елементів ВП, та виконувалось типowo для порівняння їх з допустимими значеннями на відповідній операції механічної обробки для деталі вал. Допустимі значення похибок обмежуються допусками на виготовлення пазів згідно з кресленням деталі «Обойма». Також дослідження НДС верстатного пристрою передбачає перевірку на міцність, виявлення концентраторів напружень та елементів, де напруження більші, ніж допустимі для конкретного матеріалу, та при їх наявності удосконалення конструкції. На даному етапі досліджень виконувалась перевірка еквівалентних напружень, які виникають у місцях контакту між установлювально-затискними елементами та заготовкою у результаті дії сил закріплення та силових факторів процесу різання (сили різання та моменти), а також умови за допустимими напруженнями для деталей із конкретних матеріалів. Для цього поряд з вирішенням задачі з визначення НДС вирішувалась типова контактна задача. Механічні властивості матеріалів, які використовуються у моделі, наведено у табл. 3.1.



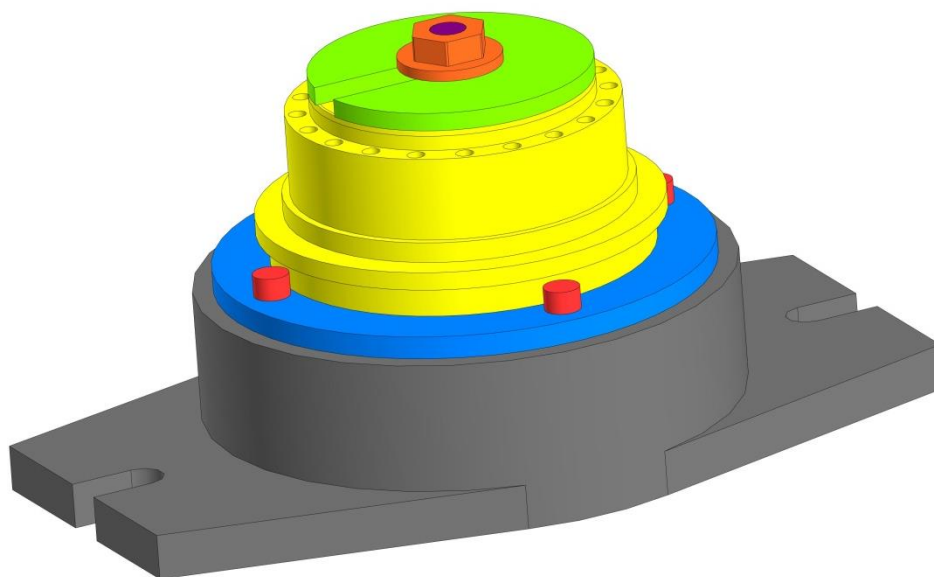


Рисунок 3.1 – Спроектований верстатний пристрій та закріплена деталь

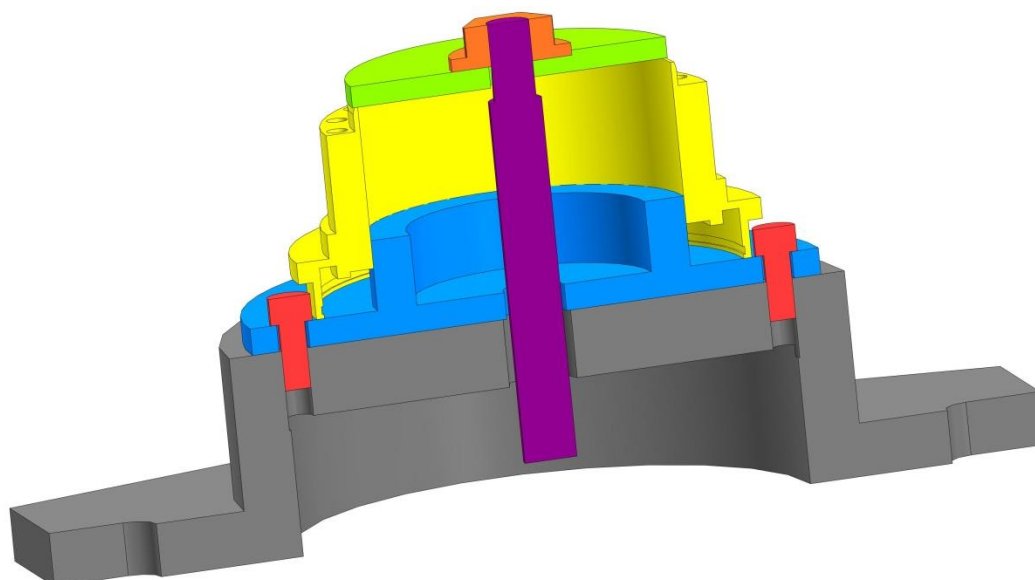


Рисунок 3.2 – Спроектований верстатний пристрій та закріплена деталь у розрізі

Таблиця 3.1 – Механічні властивості матеріалів заготовки та елементів ВП

Матеріал	Модуль пружності $E$ , ГПа	Коефіцієнт Пуассона $\mu$	Густина $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Границя міцності при розтягуванні $[\sigma_{\text{раст}}]$ , ГПа	Границя міцності при стисненні $[\sigma_{\text{ож}}]$ , ГПа	Границя текучості $\sigma_T$ , ГПа
Сталь 45 ДСТУ 1050-2016	200	0,3	7850	0,950	0,950	0,726

Першим етапом при вирішенні вищевказаних задач згідно оптимізаційного алгоритму було розроблення скінченноелементної розрахункової моделі ВП і заготовки. Кінематичні та силові граничні умови моделі верстатів типових відповідають реальним схемам закріплення із зовнішнім навантаженням та задавалися жорстким закріпленням по нижній поверхні основи пристрою, що еквівалентно встановленню ВП типових на стіл верстата. Усі елементи ВП типових жорстко зв'язані між собою шляхом об'єднання вузлів, а на поверхнях, які зв'язані одна з одною за рахунок дії сил тертя, встановлена можливість переміщення з відповідним коефіцієнтом тертя між цими поверхнями. Можливі переміщення елементів ВП типових із зазначенням типу контактів і характеристик контактних пар, а також коефіцієнтів тертя між елементами.

За допомогою розрахункового комплексу ANSYS отримані результати переміщень та напружень, що виникають у конкретних деталях та в місцях їх контакту. Як приклад, ілюстрації зі скінченно елементною сіткою, розрахунковими схемами навантажень, переміщеннями та напруженнями при обробці наведені на рис. 3.2 – 3.9. Для більш повного аналізу величини переміщень представлені ілюстрації переміщень за осями координат, де діють максимальні навантаження під час оброблення, що дає більш повне уявлення про характер зміни положення елементів ВП та впливу на точність.

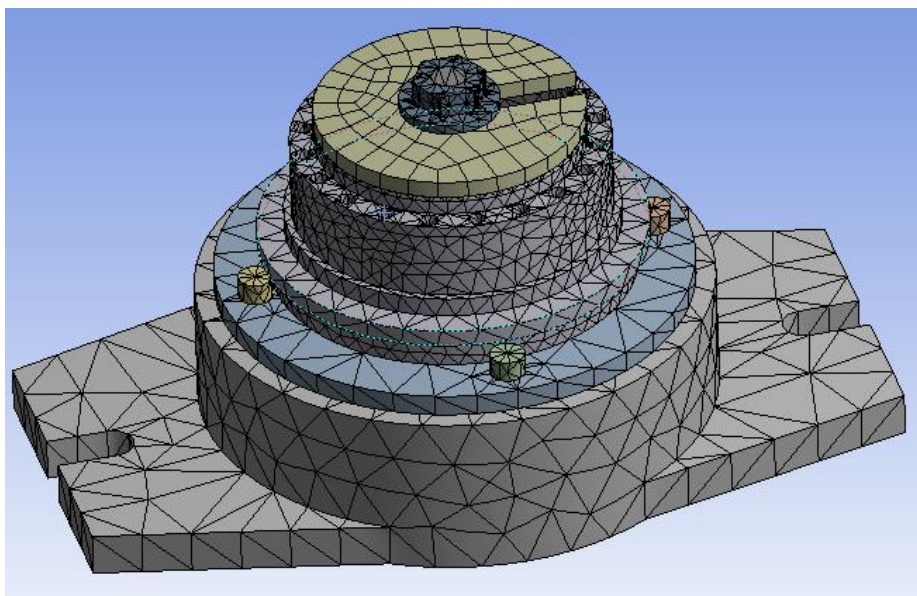


Рисунок 3.3 – Верстатний пристрій зі скінченно елементною сіткою

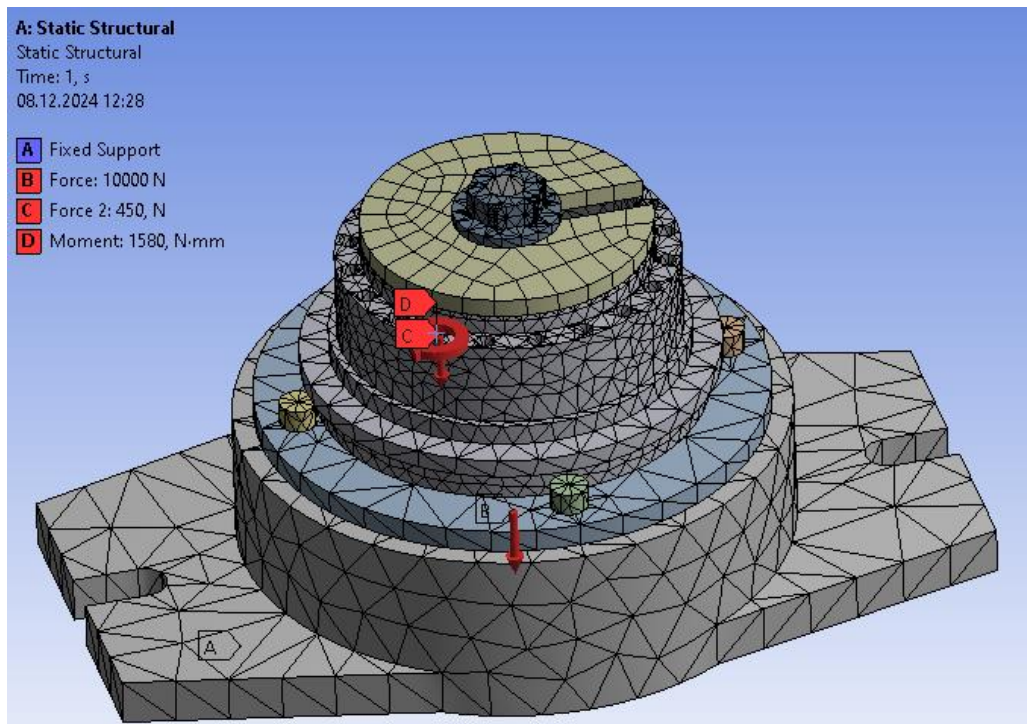


Рисунок 3.4 – Верстатний пристрій з навантаженнями та скінчено елементною сіткою

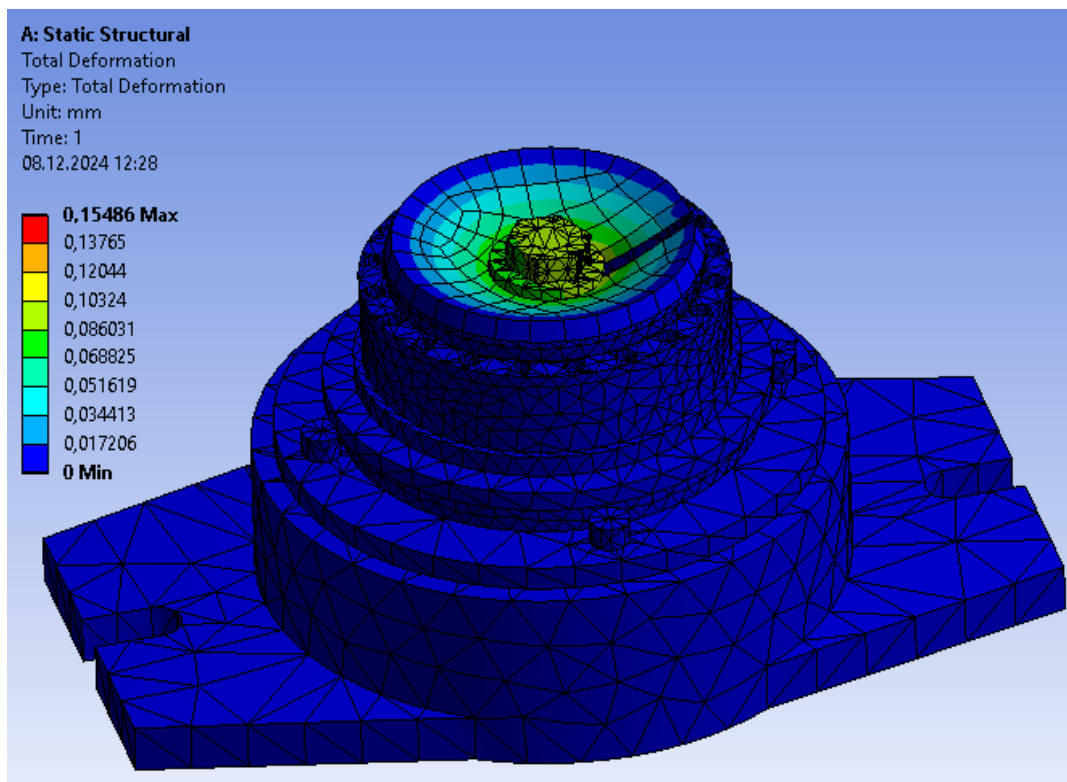


Рисунок 3.3 – Загальні переміщення

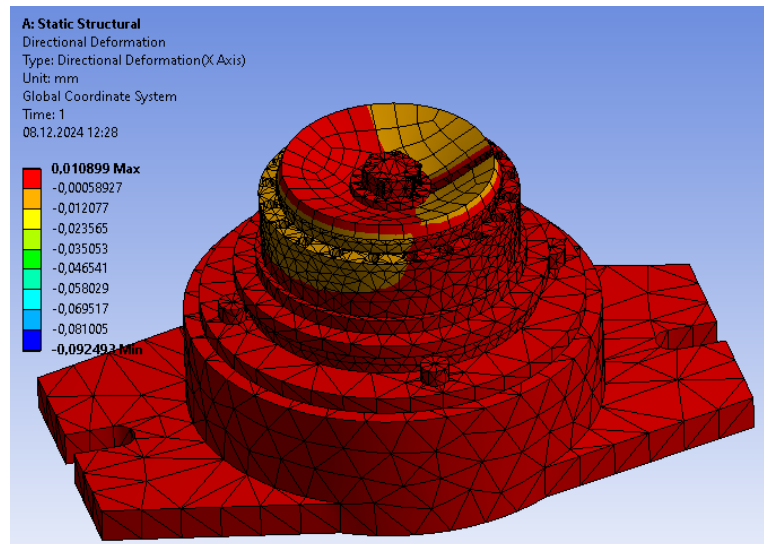


Рисунок 3.4 – Переміщення по осі X

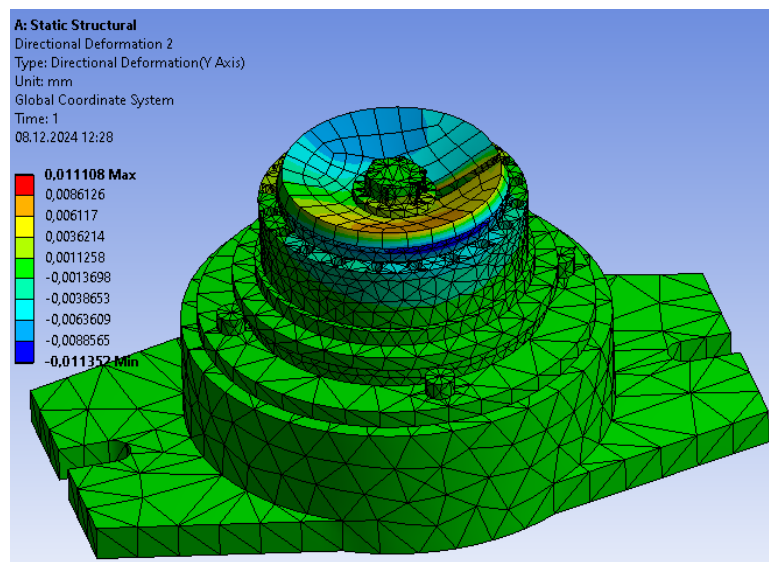


Рисунок 3.5 – Переміщення по осі Y

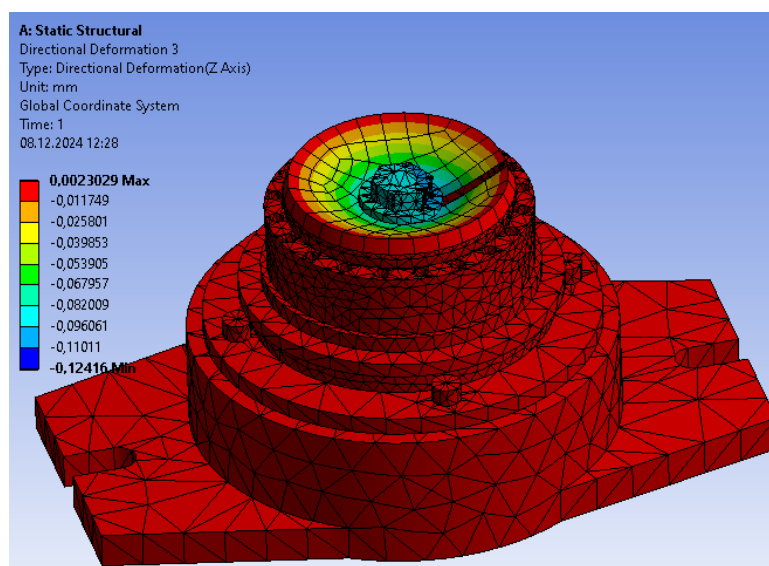


Рисунок 3.6 – Переміщення по осі Z

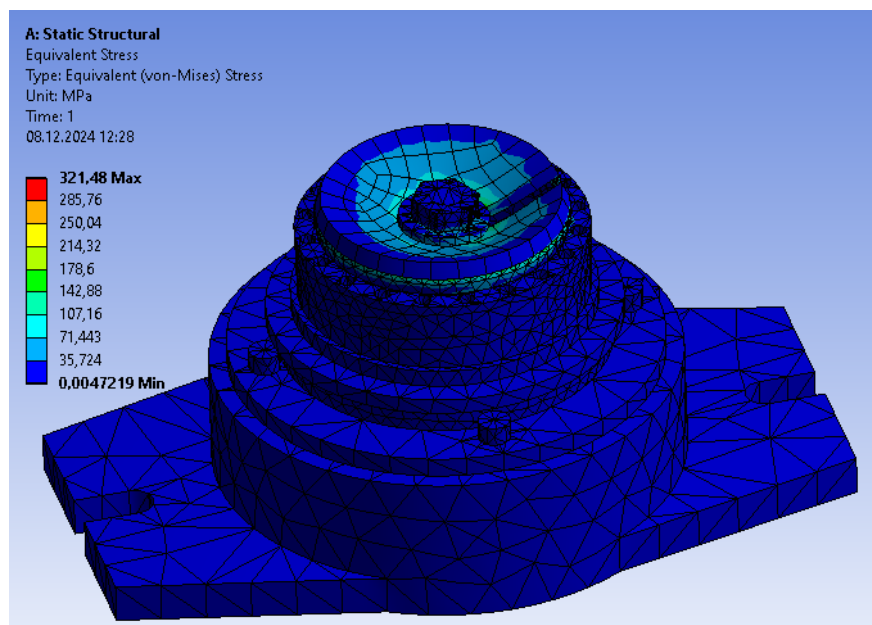


Рисунок 3.7 – Напруження у верстатному пристрої

Таблиця 3.2 – Результати чисельного моделювання у програмному комплексі ANSYS для розробленого верстатного пристрою

Технологічний перехід	Максимальні переміщення в зоні різання, мм	Допустимі переміщення, мм	Максимальні напруження, МПа	Допустимі напруження, МПа
Свердління Ø8,7 мм	0,15	0,35	321	600

### 3.3 Модальний аналіз верстатного пристрою

Для запобігання виникнення явища резонансу в процесі механічного оброблення необхідно, щоб частоти власних коливань елементів типового верстатного пристрою і частота процесу різання не співпадали. Вирішення цієї проблеми полягає у призначенні інших режимів різання. Для цього за допомогою вбудованого модуля Modal Analysis у розрахунковому комплексі ANSYS Workbench визначено частоти власних коливань верстатного пристрою, які порівняно з частотами процесу різання на всіх переходах механічної обробки на фрезерному верстаті.

Результати аналізу дозволяють за необхідності відлаштуватися від резонансу (табл. 3.3). При розрахунках усі елементи верстатного пристрою зв'язувались між собою шляхом об'єднання вузлів. Для деяких поверхонь елементів верстатного пристрою передбачено можливість відносного переміщення аналогічно із дос-

лідженнями НДС. Як приклад форми коливань представлені на рис. 3.8-3.13. Досліджено перших шість частот, адже вони є найбільш небезпечними.

Із табл. 3.3 видно, що для розробленого пристосування резонансу не виникає, оскільки перша критична частота власних коливань 798 вища за максимальну частоту процесу різання 148 Гц.

Таблиця 3.3 – Порівняльна таблиця власних частот, які виникають у процесі механічного оброблення

1-ша критична частота, Гц	2-га критична частота, Гц	3-я критична частота, Гц	Частота процесу різання (при фрезеруванні торців $n=800$ об/хв., $z=2$ ), Гц
500	524	1955	
4-а критична частота, Гц	5-а критична частота, Гц	6-а критична частота, Гц	
3028	3060	3515	

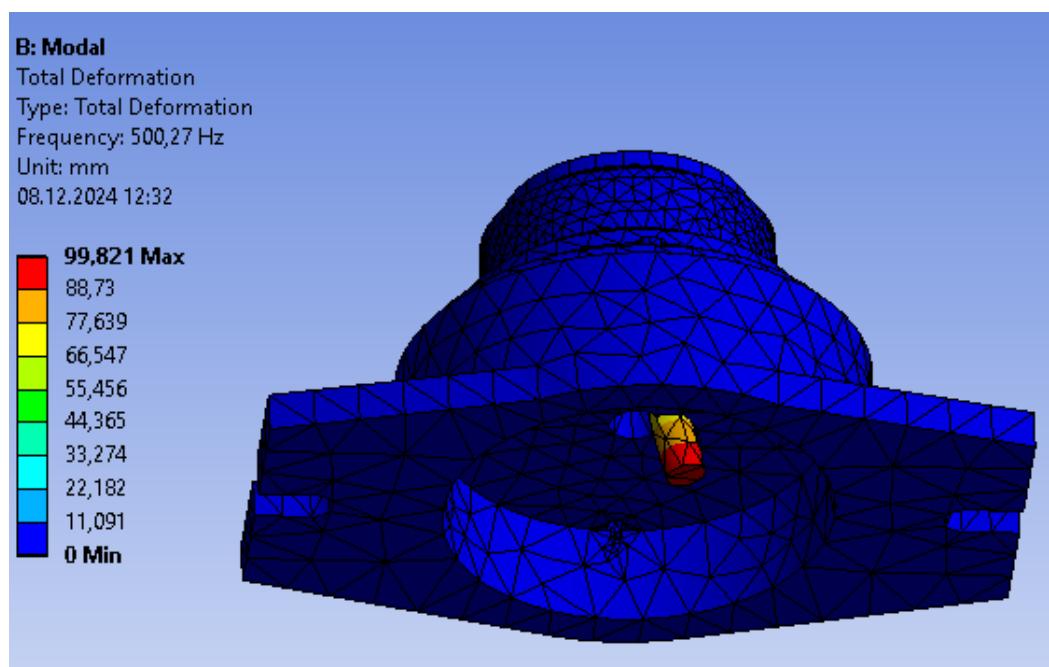


Рисунок 3.8 – Ілюстрація 1-шої частоти

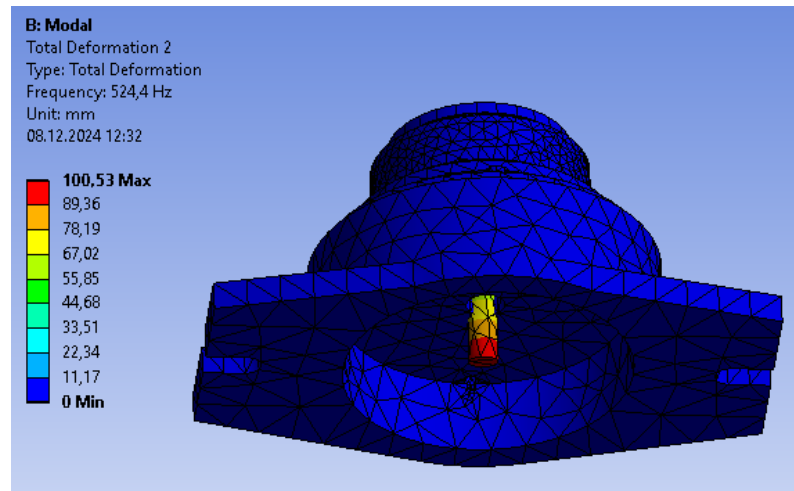


Рисунок 3.9 – Ілюстрація 2-ї частоти

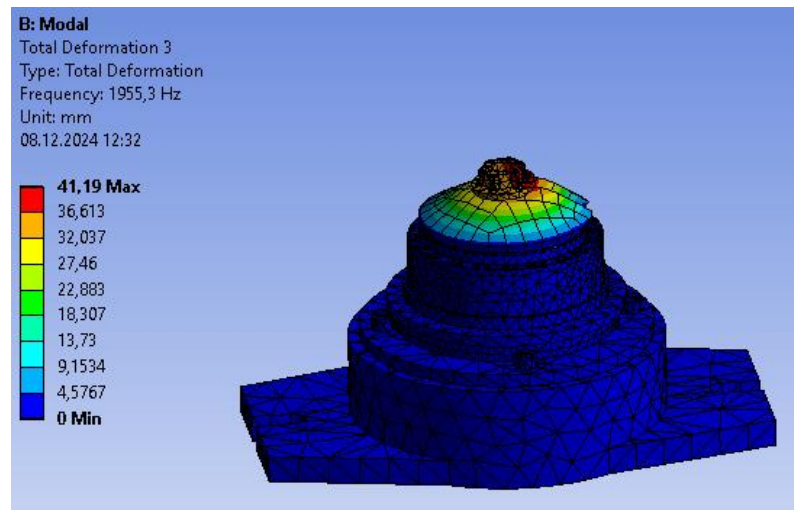


Рисунок 3.10 – Ілюстрація 3-ї частоти

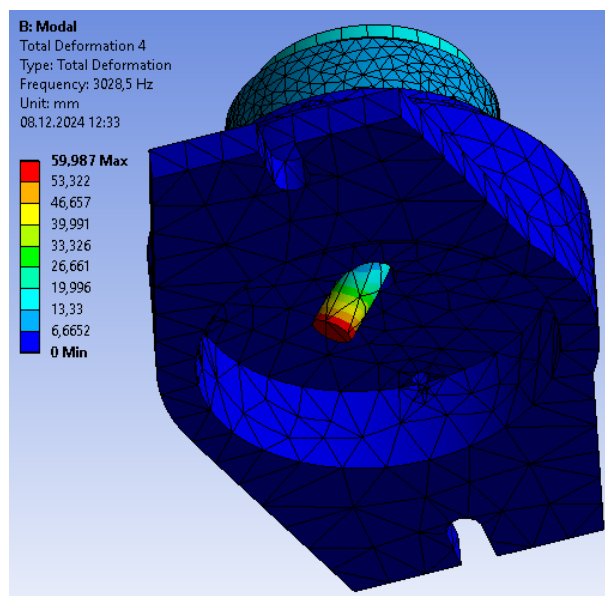


Рисунок 3.11 – Ілюстрація 4-ї частоти

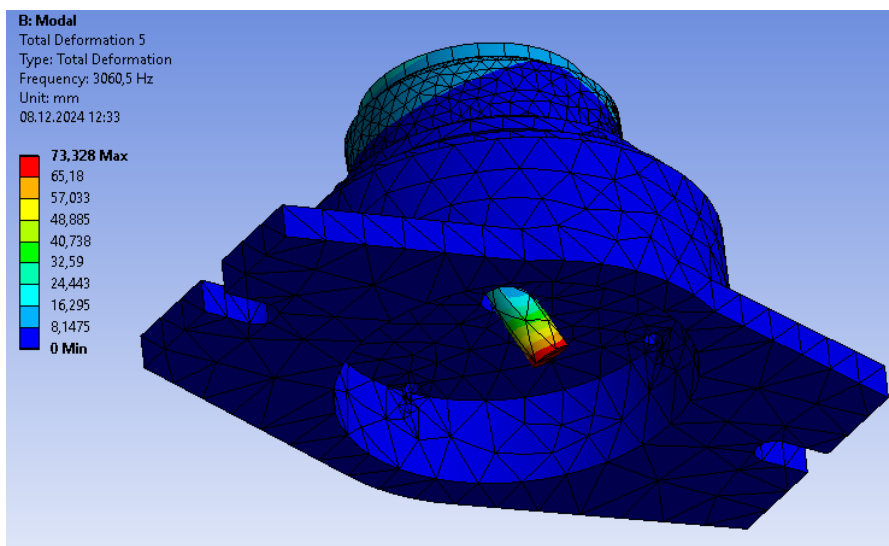


Рисунок 3.12 – Ілюстрація 5-ї частоти

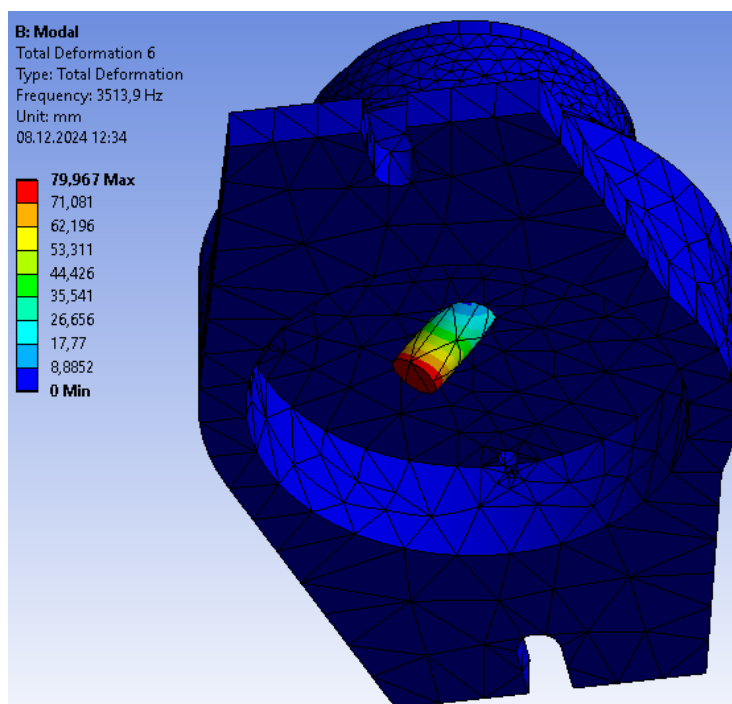


Рисунок 3.13 – Ілюстрація 6-ї частоти

Також із отриманих значень форм коливань 1-ї та 2-ї, 5-ї та 6-ї частоти та їх величини та картини коливань, а також переміщень при цьому відповідно дуже близькі за значеннями, отже це є доказом того, що розрахунки вірні та модель адекватна. Результати модального аналізу дозволяють висунути гіпотезу, що динамічна жорсткість розробленого пристосування є та буде достатньою для проведення механічного оброблення без виникнення резонансних режимів.



### 3.4 Висновок

1. Виконано кількісний та якісний аналіз свердлильної операції, що дозволило перейти до проектування удосконаленого ВП пневматичної дії.

2. Базуючись на алгоритмах та рекомендаціях, щодо проектування та оптимізації ВП сконструйовано пристрій для свердлильної операції, створені його 3D моделі для подальшого аналізу та досліджень.

3. Проведено чисельне моделювання напружено-деформованого стану, модального аналізу в програмному середовищі Ansys Workbench. Було виявлено, що у прихваті можна зробити вікно, яке не вплине на міцність, але зменшить масу ВП, тому дане вікно перенесено на його креслення. Максимальні напруження та переміщення не перевищують допустимих значень.

4. Встановлено, що резонансу у ВП не виникне, тому даний ВП можна використовувати для отримання необхідної точності і продуктивності.

## ВИСНОВКИ

Тема магістерської кваліфікаційної роботи – удосконалення технологічного процесу виготовлення обойми шляхом інтенсифікації свердлильної операції.

У ході виконання кваліфікаційної роботи магістра було виконано наступний обсяг робіт:

- аналіз первинної інформації, який включав у себе характеристику і особливості агрегата, вузла, деталі, технічні вимоги до неї, визначення типу виробництва, розрахунок технологічності та огляд базового технологічного процесу з виявленням недоліків та постановкою завдання на удосконалення;

- виконано удосконалення базового технологічного процесу виготовлення деталі в частині підбору оптимального маршруту оброблення, розрахунку первинної заготовки за техніко-економічними показниками, призначено схеми базування, які забезпечують мінімальні похибки та дотримання розмірів на аналізовану операцію, для якої також підбрані сучасні металорізальні верстати, різальний та вимірювальний інструменти, та розраховані режими оброблення;

- для аналізованої операції за класичними методиками розрахунку спроектовано верстаний пристрій для досліджуваної операції технологічного процесу.

У результаті в існуючий технологічний процес виготовлення деталі та внесено зміни спрямовані на його вдосконалення, а саме змінена послідовність операцій, замінено універсальне устаткування на обладнання з ЧПК. В якості заготовки було прийнято поковка та спроектований верстатний пристрій пневматичної дії і до цієї ж операції розроблена карта операційного налагодження.

У науковому дослідженні розглянуті питання ефективного міцного проектування верстатного пристрою для ефективної обробки отворів обойми. Визначені максимальні напруження, переміщення, та частоти коливань запропонованого верстатного пристрою та встановлено, що резонанс не виникне.

Також у роботі магістра розглянуто питання та виконаний розрахунок з розділу «Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях» у додатку.

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Бойко, Ю. І. Технологія машинобудування. Курсове проектування: навч. посіб. / Ю. І. Бойко, О. А. Литвиненко. – Київ: НУХТ, 2018. – 195 с.
2. Добрянський, С. С. Технологічні основи машинобудування. [Електронний ресурс]: підручник для студ. спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування» / С. С. Добрянський, Ю. М. Малафеев; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 379 с.
3. Мазур, М. П. Основи теорії різання матеріалів : підручник / М. П. Мазур, Ю. М. Внуков, В. Л. Доброскок, В. О. Залога та ін.; під заг. ред. М. П. Мазура. – 2-ге вид., перероб. і доп. – Львів : Новий Світ-2000, 2011. – 422 с.
4. Петров, О. В. Технологічна оснастка : навчальний посібник / О. В. Петров, С. І. Сухоруков. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 123 с.
5. Технології виготовлення деталей складної форми. Частина 1 [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньо-професійної програми «Технології машинобудування» та освітньо-наукової програми «Технології машинобудування» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; Ю. В. Петраков, С. В. Сохань, В. К. Фролов, В. М. Кореньков. – Електронні текстові дані. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 288 с.
6. Технології виготовлення деталей складної форми. Частина 2 [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньо-професійної програми «Технології машинобудування» та освітньо-наукової програми «Технології машинобудування» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; Ю.В.Петраков, С.В. Сохань, В.К. Фролов, В.М. Кореньков. – Електронні текстові дані. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 102с.
7. Паливода Ю. Є. Технологія оброблення корпусних деталей : навчальний посібник / Ю. Є. Паливода, І. Г. Ткаченко, Ю. Б. Капаціла, Ів. Б. Гевко. – Тернопіль : ТНТУ , 2016. – 156 с.

8. Паливода Ю.Є. Технологія оброблення важелів та вилок : навчальний посібник / Ю. Є. Паливода, Ю. Б. Капаціла, І. Г. Ткаченко. – Тернопіль : ТНТУ , 2013. – 56 с.

9. Паливода Ю.Є. Технологія оброблення валів : навчальний посібник / Ю. Є. Паливода, І. Г. Ткаченко, Ю. Б. Капаціла. – Тернопіль : ТНТУ , 2016. – 198 с.

10. Паливода Ю. Є. Заготовки у машинобудівному виробництві : навчально-методичний посібник / Паливода Ю.Є., Дячун А.Є. – Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2023. – 148 с.

11. Паливода Ю.Є. Технологія оброблення зубчастих коліс : навчальний посібник для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» галузі знань 13 «Механічна інженерія» / укладачі : Ю. Є. Паливода, Ю. Б. Капаціла, І. Г. Ткаченко. – Тернопіль : ТНТУ, 2016. – 136 с.

12. Паливода, Ю. Є. Інструментальні матеріали, режими різання, технічне нормування механічної обробки : навчально-методичний посібник / Ю. Є. Паливода, А. Є. Дячун, Р. Я. Лещук. – Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2019. – 240 с.

13. Приходько, В. П. Розмірне моделювання та аналіз технологічних процесів [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» / В. П. Приходько ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 249 с.

14. Паливода Ю. Є. Розмірні ланцюги : навчально-методичний посібник / укладачі : Ю. Є. Паливода, А. Є. Дячун, Ю. Б. Капаціла, І. Г. Ткаченко. – Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2018. – 132 с.

15. Технології формоутворення сучасних складнопрофільних деталей [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» спеціалізацій «Технології виготовлення літальних апаратів», «Технології машинобудування» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю. В. Петраков, С. В. Сохань, В. К. Фролов, В. М. Кореньков. – Електронні текстові дані. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 380 с.