

**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)

20\_\_ 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 штока РТ 117.234.02-03**

**шляхом структурно-параметричної оптимізації верстатного пристрою для**

**базування та закріплення заготовки на горизонтально-розточувальній операції**

Здобувача (ки) групи **ТМ.м-21**

(шифр групи)

**Макаренко Дмитро Юрійович**

(прізвище, ім'я, по батькові)

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

**Дмитро МАКАРЕНКО**

(підпис)

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Керівники

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

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

(підпис)

доцент, доктор філософії **Грігоре Маріан ПОП**

Консультант

з питань

охорони праці

ст. викладач, канд. техн. наук **Віра ФАЛЬКО**

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

(підпис)

Нормоконтролер

доцент, канд. техн. наук, доцент **Олександр ІВЧЕНКО**

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

(підпис)

## ЗМІСТ

	С.
ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ БАЗОВОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ.....	7
1.1 Аналіз службового призначення машини, вузла, деталі.....	7
1.2 Аналіз технічних вимог на виготовлення деталі .....	9
1.3 Визначення типу виробництва та форми організації робіт .....	10
1.4 Аналіз технологічності конструкції деталі .....	11
1.5 Аналіз базового технологічного процесу виготовлення деталі .....	13
1.6 Висновки та пропозиції щодо удосконалення базового технологічного процесу виготовлення деталі .....	17
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБЛЕННЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ.....	18
2.1 Розроблення перспективного технологічного процесу виготовлення деталі .....	18
2.2 Обґрунтування вибору одержання первинної заготовки, визначення розмірів, припусків і допусків на заготовку.....	21
2.3 Аналіз горизонтально-розточувальної операції.....	23
2.3.1 Аналіз схеми базування та закріплення заготовки.....	23
2.3.2 Обґрунтування вибору металорізального обладнання .....	27
2.3.3 Обґрунтування вибору верстатного пристрою, різального та контрольно-вимірювального інструменту .....	28
2.3.4 Визначення режимів різання та технічне нормування операції.....	29
2.4 Проектування верстатного пристрою для базування та закріплення заготовки на горизонтально-розточувальній операції .....	30
2.5 Висновок .....	36

РОЗДІЛ 3 СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ ВЕРСТАТНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ БАЗУВАННЯ ТА ЗАКРІПЛЕННЯ ЗАГОТОВКИ НА ГОРИЗОНТАЛЬНО-РОЗТОЧУВАЛЬНІЙ ОПЕРАЦІЇ .....	38
3.1 Статичний аналіз системи «верстатний пристрій-заготовка».....	39
3.2 Топологічна оптимізація елементів системи «верстатний пристрій- заготовка».....	50
3.3 Динамічний аналіз системи «верстатний пристрій-заготовка» .....	56
3.4 Висновок .....	59
ВИСНОВКИ.....	61
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	62

## ВСТУП

*Актуальність теми.* Шток РТ 117.234.02-03 входить до складу центрифуги безперервної дії з вивантаженням пульсуючим поршнем, що застосовуються для розділення суспензій з середньо- і дрібнозернистою, переважно розчинної твердою фазою, коли допускається дроблення частинок осаду. Завдяки високій продуктивності, простоті конструкції, безперервності технологічного процесу, мінімального обслуговування ці центрифуги застосовують в різних технологічних процесах хімічної, нафтопереробної, фармацевтичної, м'ясомолочної, рибопереробної та інших галузях промисловості. Тож удосконалення технологічних процесів виготовлення деталей центрифуг є актуальним завданням, що потребує комплексних технологічних рішень.

*Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.* Тема роботи пов'язана з науковим напрямком досліджень кафедри «Технологія машинобудування, верстати та інструменти» СумДУ щодо підвищення ефективності процесів механічного оброблення заготовок деталей.

*Мета і задачі дослідження.* Метою дослідження є підвищення ефективності технологічного процесу виготовлення «штока» шляхом оптимізації конструкції верстатного пристрою для базування та закріплення заготовки на горизонтально-розточувальній операції.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені такі *задачі*:

- 1) виконати аналіз базового технологічного процесу виготовлення «штока»;
- 2) розробити перспективний технологічний процес виготовлення «штока»;
- 3) спроектувати верстатний пристрій для базування та закріплення заготовки «штока» на горизонтально-розточувальній операції;
- 4) виконати дослідження спроектованої конструкції верстатного пристрою методами статичного, динамічного аналізу та методом топологічної

оптимізації. Сформулювати рекомендації щодо вдосконалення конструкції верстатного пристрою.

*Об'єкт дослідження* – технологічний процес виготовлення «штока», операція горизонтально-розточувальна.

*Предмет дослідження* – структура та параметри горизонтально-розточувальної операції, верстатний пристрій для базування та закріплення заготовки на горизонтально-розточувальній операції.

*Методи дослідження.* Твердотільну модель запропонованої конструкції верстатного пристрою розроблено в пакеті графічного дизайну SolidWorks. Дослідження спроектованої конструкції верстатного пристрою методами статичного, динамічного аналізу та методом топологічної оптимізації виконано в програмному комплексі скінчено-елементного аналізу ANSYS Workbench (модулі Static Structural, Modal та Structural Optimization).

*Практичне значення* отриманих результатів полягає в тому, що на основі теоретичних та експериментальних досліджень оптимізовано конструкцію окремих елементів верстатного пристрою для установки заготовки «штока» на горизонтально-розточувальній операції та сформульовано рекомендації щодо вдосконалення його конструкції з забезпечення її стійкої роботи під дією статичних та динамічних навантажень та структурно-параметричної оптимізації операції загалом.

*Апробація роботи.* Методики статичного, динамічного аналізу та топологічної оптимізації елементів спроектованого верстатного пристрою впроваджені в навчальний процес в рамках вивчення вибіркової дисципліни «Комп'ютерний інженерний аналіз та оптимізація технологічних процесів і систем» циклу професійної та практичної підготовки здобувачів, які навчаються за ОПП «Технології машинобудування» (другий (магістерський) рівень вищої освіти)..

*Публікації.* Тези доповідей за результатами досліджень подано до редакції Всеукраїнської науково-технічної конференції «Сучасні технології у

промисловому виробництві» (СумДУ, м. Суми) та будуть опубліковані у квітні 2024 р.

*Особистий внесок автора.* Автором виявлені недоліки базової технології виготовлення «штока», запропоновані технологічні рішення, спрямовані на вдосконалення існуючого технологічного процесу оброблення заготовки. Спроектвані конструкції верстатного та контрольно-вимірювального пристроїв. Виконано дослідження конструкції верстатного пристрою методом статичного аналізу та динамічного аналізу. Сформульовані висновки та рекомендації щодо вдосконалення конструкції пропонованого верстатного пристрою та горизонтально-розточувальної операції загалом.

Структура та обсяг роботи. Робота складається зі вступу, 3-х розділів, загальних висновків, переліку використаних посилань з 17 найменувань, 64 сторінок основного тексту, 28 рисунків та 9 таблиць.

РОЗДІЛ 1  
АНАЛІЗ БАЗОВОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ  
ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ

1.1 Аналіз службового призначення машини, вузла, деталі

Шток РТ 117.234.02-03 входить до складу центрифуги безперервної дії з вивантаженням пульсуючим поршнем, що застосовуються для розділення суспензій з середньо- і дрібнозернистою (розмір часток більше 30 мкм), переважно розчинної твердою фазою, коли допускається дроблення частинок осаду. Останнє є їх недоліком. Центрифуги із суцільним барабаном застосовують для виділення твердої речовини з важкофільтрованих суспензій [1].

У центрифугі цього суспензія подається безперервно, осад періодично вштовхується поршнем – штовхачем із дірчастого барабана, розташованого на горизонтальному валу (див. рисунок 1.1).

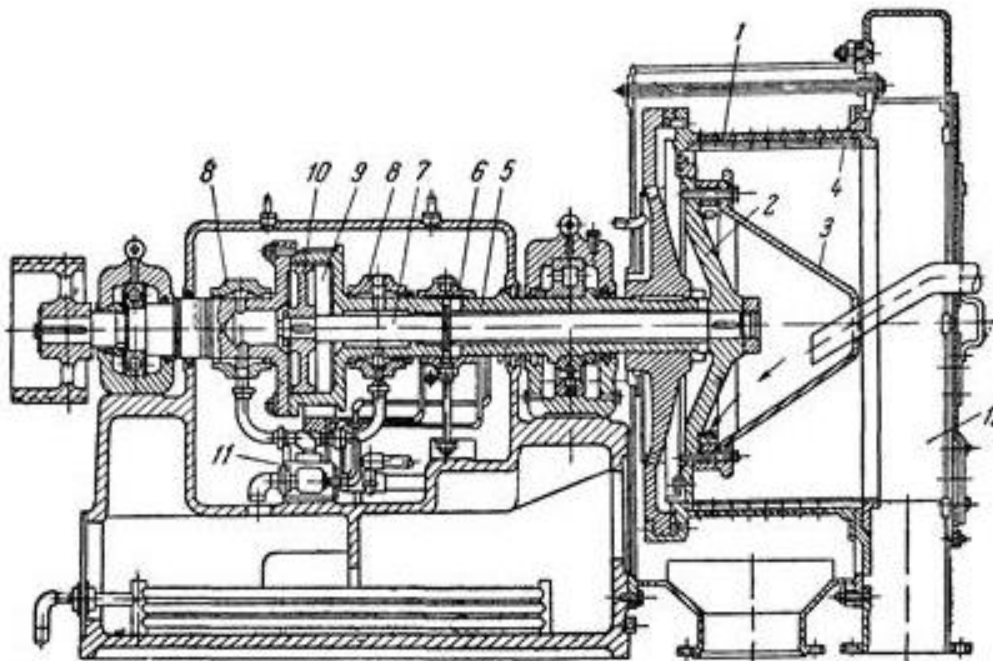


Рисунок 1.1 – Схема центрифуги безперервної дії з вивантаженням пульсуючим поршнем

Усередині барабана 1 вздовж його осі переміщається поршень-штовхач 2, закріплений на кінці штока 7. Шток встановлений всередині порожнього вала 5, обертається разом з ним і одночасно здійснює зворотно-поступальний рух.

За кожен робочий хід вивантажується така кількість осаду, яка відповідає довжині поршня. Коли поршень рухається у зворотному напрямку, на поверхні сита 4 утворюється новий шар осаду. Під час наступного робочого ходу поршня з барабана виштовхується нова порція осаду.

Шток під час роботи ізольований від впливу зовнішнього середовища та разом із валом обертається на частоті 1230 об/хв. Основний вид руйнування – утома матеріалу в місцях концентрації напружень. Абразивне зношення під дією зовнішнього середовища ні вал, ні шток не відчувають, оскільки в місцях тертя з елементами підшипника ковзання встановлені лабіринтові шайби і втулки.

Робота вала, а разом з ним і штока, здійснюється в умовах динамічних, знакозмінних, циклічних навантажень за високих частот обертання, за нормальної температури без впливу зовнішнього середовища. Під час роботи система «вал-шток» відчуває вигин з крученням в сукупності з навантаженнями стиснення, що виникають від осьової сили за невеликих температур.

Аналіз конструкції штока (див. креслення деталі в додатку А) дозволяє виділити виконавчі, базові та вільні його поверхні.

Так, до виконавчих можна віднести конічну поверхню штока конусністю 1:10АТ9. Саме ця поверхня є базовою для розміщення поршня-штовхача, а функціональним призначенням штока є забезпечення зворотно-поступального руху поршня-штовхача. Отже поверхня конусу об'єднує в собі функції виконавчих поверхонь та допоміжних конструкторських баз.

До основних конструкторських баз можна віднести поверхні:  $\varnothing 140f7$  та  $\varnothing 80h9$ . Саме ці поверхні визначають положення штока у вузлі. Водночас за співвісними циліндричними поверхнями  $\varnothing 140f7$  та  $\varnothing 80h9$  реалізується подвійна напрямна база, що позбавляє деталь 4-х ступенів вільності. Вакантними для штока залишаються зворотно-поступальний рух вздовж його центральної осі та обертальний рух навколо центральної осі. Визначення основних



конструкторських баз штока є важливим для забезпечення точності оброблення його заготовки, оскільки важливим фактором, що впливає на забезпечення точності зокрема взаємного розміщення оброблених поверхонь, є дотримання принципу співпадіння конструкторських, технологічних та вимірювальних баз.

Усі інші поверхні штока виконують функції допоміжних конструкторських баз або є вільними.

## 1.2 Аналіз технічних вимог на виготовлення деталі

Шток РТ 117.234.02-03 представляє собою тіло обертання типу «шток», ступінчастий з глибоким отвором.

Габарити деталі:  $\varnothing 140 \text{ max} / \varnothing 76 \text{ min} \times 1787 \text{ мм}$ .

Маса готової деталі – 139 кг.

Велике співвідношення довжини штока до його діаметра ( $l/d > 10$ ) робить його конструкцію піддатливою.

Матеріал деталі: сталь 40Х ДСТУ 7806:2015 [2]. Основними хімічними елементами сталі 40Х є залізо та вуглець (0,36–0,44%), хром (0,8–1,1%). Межа міцності за температури випробування 20° після покращання (загартування та високого відпуску) – 980 МПа, межа текучості – 758 МПа.

Матеріалами-замінниками сталі 40Х є сталі марок 45Х, 40ХН, 40ХС, 40ХФА, 40ХГТР.

Призначення сталі 40Х: осі, вали, вал-шестерні, плунжери, штоки та інші покращувані деталі підвищеної міцності.

Серед поверхонь деталі можна виділити такі, що характеризуються високою точністю розмірів, взаємного розміщення, форми та низькою шорсткістю. Це поверхні конусу 1:10АТ9, циліндричні поверхні  $\varnothing 140f7$ ,  $\varnothing 80h9$ . Всі зазначені поверхні виконують функції виконавчих поверхонь, основних та допоміжних конструкторських баз. Для цих поверхонь заданий допуск співвісності 0,03 мм щодо центральної осі деталі. Для поверхні  $\varnothing 140f7$  задані допуски круглості (0,02 мм) та циліндричності (0,02 мм). Для поверхні  $\varnothing 80h9$

задані допуски круглості (0,03 мм) та циліндричності (0,03 мм). Шорсткість конусу та поверхні  $\varnothing 140f7$  задана на рівні 0,8 мкм Ra, поверхні  $\varnothing 80h9$  – 1,6 мкм Ra.

Такі жорсткі технічні вимоги пояснюються функціональним призначенням поверхонь. За не дотримання цих вимог експлуатаційні характеристики виробу будуть знижені.

Точність розмірів вільних поверхонь регламентовано на рівні 14 квалітету точності, шорсткість поверхонь задано на рівні 6,3 мкм Ra.

### 1.3 Визначення типу виробництва та форми організації робіт

Згідно з [3] тип виробництва характеризується коефіцієнтом закріплення операцій  $K_{з.о}$ , що визначає відношення всіх технологічних операцій, виконуваних або таких, що підлягають виконанню в цеху (на дільниці) впродовж місяця, до кількості робочих місць.

Виконаємо розрахунок  $K_{з.о}$  з урахуванням таких даних:

- річний обсяг випуску –  $N_p = 600$  шт.;
- нормативний коефіцієнт завантаження обладнання для серійного виробництва –  $\eta_{з.н.} = 0,75$  [3];
- кількість механічних операцій за базовим технологічним процесом – 8;
- штучний час оброблення заготовки за операціями – відповідно до норм базового технологічного процесу;
- режим роботи підприємства – двозмінний;
- дійсний річний фонд часу роботи обладнання –  $F_d = 4015$  год. [3].

Розрахунок  $K_{з.о}$  виконаємо за методикою [3] з використанням MS Excel. Результати розрахунку  $K_{з.о}$  наведені в додатку Б.

За результатами розрахунку маємо  $K_{з.о} = 11,18$ , що відповідає середньосерійному типу виробництва ( $10 < 11,18 < 20$ ) [3].

Відомо, що серійне виробництво займає проміжне положення між одиничним на масовим. Отже воно характеризується обмеженою номенклатурою виробів, що виготовляють періодично повторюваними партіями.

Партії деталей складаються з однойменних, однотипних за конструкцією і однакових за розмірами виробів, що запускаються у виробництво одночасно. За результатами розрахунку в MS Excel (див. додаток Б) визначено партію запуску виробів – 56 шт.

В серійному виробництві використовують універсальне і спеціалізоване металорізальне обладнання, верстати з ЧПК та обробні центри з ЧПК. Засоби технологічного оснащення – зазвичай універсальні, в обґрунтованих випадках – спеціальні. Велике поширення мають універсально-збірні, переналагоджувальні верстатні пристрої. В якості первинних заготовок використовують гарячий і холодний прокат, точні види лиття і поковки, одержувані штампуванням. Необхідну точність поверхонь зазвичай забезпечують методами автоматичного отримання розмірів, іноді – методами пробних ходів і промірів з частковим застосуванням розмічування. Кваліфікація робітників вище, ніж у масовому виробництві, але нижче, ніж в одиничному [3].

Як форму організації робіт беремо групову, характерну для серійного виробництва. В умовах групової форми організації робіт зазвичай формують предметно-замкнені дільниці для виготовлення групи виробів, подібних за своїми конструктивно-технологічними ознаками [3].

#### 1.4 Аналіз технологічності конструкції деталі

Шток має форму багатоступінчастого тіла обертання з великою кількістю специфічних конструктивних елементів у вигляді шпонкових та наскрізних пазів (щілин), різьбових канавок, канавок під установаження стопорної шайби тощо. Зовнішні поверхні є гладкими та мають циліндричну або конічну форму. Особливістю конструкції штока є наявність довгого глухого ступінчастого циліндричного отвору.

До нетехнологічних ознак конструкції деталі можна віднести її велику довжину за незначного поперечного діаметра. Це визначає низьку поперечну жорсткість конструкції деталі та необхідність використання додаткових опор під

час оброблення заготовки на металорізальних верстатах (зокрема на токарних та круглошліфувальних операціях).

Матеріал деталі – сталь 40Х, є поширеним, має невелику частку легуючих елементів (зокрема хрому), що визначає його доступність та невелику вартість. Оброблюваність сталі 40Х різанням – задовільна.

Згідно з базовою технологією заготовкою для штока є круглий гарячекатаний прокат. Прокат є нетехнологічною ознакою, оскільки передбачає наявність напусків та великі припуски на механічне оброблення.

Нетехнологічною ознакою конструкції деталі є відносно великі габарити та маса деталі. Велика довжина та маса заготовки викликає певні труднощі під час її транспортування та зберігання, під час установаження заготовки на металорізальних верстатах тощо. Це в свою чергу потребує використання механізованих підйомних та транспортних засобів.

Конструкція деталі є простою та відкритою. Вона має багато розвинених поверхонь, що претендують на роль технологічних баз. Конструктором передбачено штучну технологічну базу у вигляді центрального отвору В10. До всіх оброблюваних поверхонь забезпечений вільний доступ різального інструмента. Певні труднощі викликає оброблення глухого циліндричного отвору діаметром 48 мм на глибину 755 мм. Формування такого отвору потребує багатопрохідного оброблення з використанням методів свердління, розточування тощо. Оброблення такого отвору утруднене через складність видалення стружки, підведення та відведення охолоджувальної рідини. Під час оброблення такого отвору можливі утворення специфічних геометричних похибок у вигляді відхилень осі отвору від прямолінійності та співвісності осі отвору та центральної осі деталі, відхилень від циліндричності тощо.

У конструкції деталі має місце ряд високоточних поверхонь. Наявність таких високих вимог є нетехнологічним ознакою, оскільки оброблення заготовки стає більш трудомістким, вимагає введення додаткових чистових та оздоблювальних етапів оброблення, застосування металорізальних верстатів підвищеної точності тощо: зовнішня циліндрична поверхня  $\varnothing 140f7$  ( $Ra =$

0,8 мкм, допуск круглості – 0,02 мм, допуск циліндричності – 0,02 мм, допуск співвісності вала щодо осі центрів – 0,03 мм); зовнішня циліндрична поверхня  $\varnothing 80h9$  ( $Ra = 1,6$  мкм допуск круглості – 0,03 мм, допуск циліндричності – 0,03 мм, допуск співвісності щодо осі центрів – 0,03 мм); зовнішня конічна поверхня з конусністю 1:10AТ9 ( $Ra = 0,8$  мкм, допуск співвісності вала щодо осі центрів – 0,03 мм); шпонкові пази шириною 18Н9 ( $Ra = 1,6$  мкм, допуски симетричності (0,08 мм) та паралельності (0,02 мм) бокових поверхонь пазів).

До нетехнологічних ознак можна віднести закриті конструкції шпонкових пазів та наскрізних щілин, оброблення яких неможливо напрохід та є низькопродуктивним.

Проставлення розмірів деталі виконано вірно, що дозволяє сумістити конструкторські, технологічні й вимірювальні бази, тим самим, усунути похибки базування під час механічного оброблення заготовки, дає змогу підвищити стабільність забезпечення точності оброблення поверхонь деталі, що також є технологічним фактором.

### 1.5 Аналіз базового технологічного процесу виготовлення деталі

Для аналізу базового технологічного процесу наведемо його короткий опис в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Короткий опис базового технологічного процесу виготовлення деталі

Номер операції	Найменування та зміст операції	Технологічне обладнання	Схема базування, верстатний пристрій
005	Заготівельна: круглий гарячекатаний прокат	–	–
010	Термічне оброблення: покращання (загартування та високий відпуск) для зняття внутрішніх напружень	Термічна піч	–

Продовження таблиці 1.1

Номер операції	Найменування та зміст операції	Технологічне обладнання	Схема базування, верстатний пристрій
015	Горизонтально-розточувальна: фрезерування зовнішніх торців заготовки, центрування заготовки	Горизонтально-розточувальний верстат мод. 2650	За циліндричними поверхнями та плоским торцем в опорних призмах з упором в торець
020	Технічний контроль: контроль розмірів заготовки, параметрів центральних отворів	–	–
025	Токарно-гвинторізна: чорнове оброблення заготовки обточуванням (циліндричних та торцевих поверхонь)	Токарно-гвинторізний верстат мод. 16К30	За циліндричною поверхнею з упором в торець та центровим отвором в токарному патроні з обертовим центром, люнет
030	Токарно-гвинторізна: півчистове та чистове оброблення заготовки обточуванням (циліндричних та торцевих поверхонь, конусу, канавок, різі)	Токарно-гвинторізний верстат мод. 16К30	За циліндричною поверхнею з упором в торець та центровим отвором в токарному патроні з обертовим центром, люнет
035	Технічний контроль: контроль розмірів заготовки	–	–
040	Круглошліфувальна: чистове шліфування циліндричних поверхонь $\varnothing 140f7$ , $\varnothing 80h9$ , конічної поверхні 1:10АТ9	Круглошліфувальний верстат мод. 3М174Е	За центровими отворами в повідковому патроні з хомутиком та жорстким центром, люнет
045	Технічний контроль: контроль розмірів заготовки	–	–
050	Горизонтально-розточувальна: оброблення глухого центрального отвору свердлінням, розточуванням, нарізання внутрішньої різі	Горизонтально-розточувальний верстат мод. 2650	За циліндричними поверхнями та плоским торцем в опорних призмах з упором в торець

Продовження таблиці 1.1

Номер операції	Найменування та зміст операції	Технологічне обладнання	Схема базування, верстатний пристрій
055	Технічний контроль: контроль розмірів заготовки	–	–
060	Розмічування: розмічування шпонкових пазів та щілин	Розмічувальний стіл	–
065	Шпонково-фрезерна: фрезерування шпонкового паза та прорізання щілин	Вертикальний фрезерний верстат мод. 6A56	За циліндричними поверхнями та плоским торцем в опорних призмах з упором в торець
070	Технічний контроль: контроль розмірів заготовки	–	–
075	Слюсарна: калібрування різі, видалення задирків	Слюсарний стіл	–
080	Технічний контроль: контроль розмірів деталі та якості поверхонь	–	–
085	Маркування	–	–

Аналіз таблиці 1.1 показав, що загалом базовий технологічний процес виготовлення штока побудований грамотно, з дотриманням принципу поетапності, що передбачає послідовне досягнення точності розмірів, взаємного розміщення та форми поверхонь через послідовну реалізацію чорнового, півчистового, чистового та фінішного. Так, забезпечення точності поверхонь конуса 1:10AТ9 та  $\varnothing 140f7$  реалізується на операціях точіння (чорновий, півчистовий та чистовий етапи) та круглого шліфування (фінішний етап). Дотримуються принципи співпадіння та постійності баз, що сприяє стабілізації точності розмірів, взаємного розміщення та форми поверхонь. Низька шорсткість поверхонь конуса та  $\varnothing 140f7$  забезпечується через використання методу абразивного шліфування, для якого 7-й квалітет точності та шорсткість 0,8 мкм Ra є економічно досяжними. Шорсткість інших поверхонь деталі (3,2–6,3 мкм Ra) забезпечується підбором оптимальних режимів різання та твердосплавних марок різального інструмента.

Одержання первинної заготовки у вигляді круглого гарячекатаного прокату не є оптимальним для умов серійного виробництва, оскільки характеризується великими напуска та припусками та великими витратами ресурсів на їх подальше видалення.

До недоліків базового технологічного процесу можна віднести низький рівень його автоматизації та механізації. Відсутні операції з ЧПК та комплексні операції з ЧПК. Верстатні пристрої мають ручний привід закріплення заготовки. Все це визначає низький рівень продуктивності виробництва, незадовільні умови роботи працівників, низьку стабільність забезпечення точності та якості поверхонь.

Верстати, що використовуються в діючому виробництві є морально та фізично застарілими.

Метод круглого шліфування дозволяє забезпечити високу точність та якість поверхонь деталі. Водночас відомо, що абразивне шліфування характеризується великим виділенням тепла, що за умови неправильного підбору режимів шліфування, змащувально-охолоджувальної рідини, зменшення різальної здатності круга, спричиняє поверхневі дефекти у вигляді прижогів. Також слід пам'ятати, що абразивне шліфування має нижчу продуктивність порівняно з лезовим оброблення (наприклад тонким точінням).

Розмічувальна операція характеризується низькою продуктивністю та необхідністю залучення висококваліфікованих робітників, що є нетехнологічним.

В умовах діючого виробництва контроль допусків круглості та циліндричності реалізується частково, у вигляді визначення еліпсності через вимірювання розмірів циліндричних поверхонь у взаємно перпендикулярних напрямках.



## 1.6 Висновки та пропозиції щодо удосконалення базового технологічного процесу виготовлення деталі

1. Для підвищення продуктивності виробництва, стабілізації точності та якості поверхонь деталі, покращання умов роботи працівників пропонується замінити морально та фізично застарілі верстати базового технологічного процесу сучасними верстатами з ЧПК, оснащених верстатними пристроями з механізованими приводами закріплення заготовки. Застосування верстатів з ЧПК водночас дозволить також вилучити розмічувальну операцію.

2. Під час вибору способу одержання первинної заготовки слід розглянути альтернативні до круглого гарячекатаного прокату варіанти з їх техніко-економічним обґрунтуванням.

3. Замість абразивного шліфування на круглошліфувальній операції пропонується впровадити процес суперфінішування, що може бути реалізований за наявності мобільної суперфінішної головки на токарному металорізальному верстаті. Розмірне суперфінішування є доволі продуктивним процесом оздоблювального етапу оброблення, що дозволяє забезпечити як високу точність розмірів та форми поверхонь так і високу якість поверхонь без недоліків, притаманних абразивному шліфуванню.

РОЗДІЛ 2  
РОЗРОБЛЕННЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ  
ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ

2.1 Розроблення перспективного технологічного процесу виготовлення деталі

З урахуванням висновків та пропозицій щодо удосконалення базового технологічного процесу виготовлення деталі запропоновано перспективний технологічний процес, короткий опис якого наведений в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Короткий опис перспективного технологічного процесу виготовлення деталі

Номер операції	Найменування та зміст операції	Технологічне обладнання	Схема базування, верстатний пристрій
005	Оброблення тиском: штампування поковки	КГШП	–
010	Термічне оброблення: нормалізаційний відпал для зняття внутрішніх напружень	Термічна піч	–
015	Горизонтально-розточувальна: фрезерування зовнішніх торців заготовки, центрування заготовки	Горизонтальний розточувальний верстат з системою цифрової індикації мод. КНВ130	За циліндричними поверхнями та плоским торцем в опорних призмах з упором в торець
020	Технічний контроль: контроль розмірів заготовки	–	–
025	Токарна з ЧПК: чорнове оброблення заготовки обточуванням (циліндричних та торцевих поверхонь)	Токарний верстат з ЧПК мод. ST-45L (HAAS)	За циліндричною поверхнею з упором в торець та центровим отвором в токарному патроні з обертовим центром, люнет

Продовження таблиці 2.1

Номер операції	Найменування та зміст операції	Технологічне обладнання	Схема базування, верстатний пристрій
030	Токарна з ЧПК: півчистове та чистове оброблення заготовки обточуванням (циліндричних та торцевих поверхонь, конусу, канавок, різі)	Токарний верстат з ЧПК мод. ST-45L (HAAS)	За циліндричною поверхнею з упором в торець та центровим отвором в токарному патроні з обертовим центром, люнет
035	Технічний контроль: контроль розмірів заготовки	—	—
040	Горизонтально-розточувальна: оброблення глухого центрального отвору свердлінням, розточуванням, нарізання внутрішньої різі	Горизонтальний розточувальний верстат з системою цифрової індикації мод. КНВ130	За циліндричними поверхнями та плоским торцем в опорних призмах з упором в торець
045	Технічний контроль: контроль розмірів заготовки	—	—
050	Комплексна на обробному центрі з ЧПК: фрезерування шпонкового паза та прорізання щілин	Вертикальний свердл.-фрез.-розточ. верстат з ЧПК типу обробний центр мод. MV1750S (Leaderway)	За циліндричними поверхнями та плоским торцем в опорних призмах з упором в торець
055	Технічний контроль: контроль розмірів заготовки	—	—
060	Токарно-гвинторізна: суперфінішування циліндричних поверхонь $\varnothing 140f7$ , $\varnothing 80h9$ , конічної поверхні 1:10A9	Токарно-гвинторізний верстат з системою цифрової індикації мод. C6246E/2000 (STALEX)	За центровими отворами в повідковому патроні з хомутиком та жорстким центром, люнет
065	Технічний контроль: контроль розмірів заготовки	—	—
070	Слюсарна: калібрування різі, видалення задирків	Слюсарний стіл	—
075	Технічний контроль: контроль розмірів деталі та якості поверхонь	—	—
080	Маркування	—	—

Згідно з рекомендаціями, сформульованими на основі аналізу базового технологічного процесу виготовлення деталі майже всі верстати були замінені сучасними верстатами з ЧПК або верстатами з системою цифрової індикації. Для базування та закріплення заготовки на всіх операціях окрім токарно-гвинторізної 060 (суперфінішної) планується застосовувати верстатні пристрої з механізованим (пневматичним) приводом закріплення заготовки.

Застосування верстатів з ЧПК та верстатних пристроїв, установчі елементи яких адаптовані до конфігурації заготовки штока дозволило вилучити з маршруту операцію розмічування.

Водночас застосування верстатів з ЧПК та зазначених верстатних пристроїв дало змогу замінити метод пробних проходів на метод автоматичного забезпечення точності розмірів, що сприяє стабілізації точності розмірів, взаємного розміщення, форми та якості поверхонь.

Забезпечення точності та якості високоточної циліндричної поверхні  $\varnothing 140f7$ , циліндричної поверхні  $\varnothing 80h9$  та конічної поверхні 1:10AT9 досягається через реалізацію чотирьох етапів: чорнове обточування, півчистове обточування, чистове обточування та суперфінішування. Замість абразивного шліфування на фінішному етапі було впроваджено суперфінішування.

Як спосіб одержання первинної заготовки запропоновано альтернативний варіант – поковка штампуванням на КГШП. Обґрунтованість цього рішення буде підтверджено в подальшому за результатами техніко-економічного обґрунтування.

Для контролю допусків круглості та циліндричності запропоновано використовувати пристрій для вимірювання відхилень круглості та форми HOMMEL-ETAMIC FMS 8200 (спеціальне виконання).

## 2.2 Обґрунтування вибору одержання первинної заготовки, визначення розмірів, припусків і допусків на заготовку

В базовому технологічному процесі заготовка одержується відрізанням круглого гарячекатаного прокату, що є нераціональним для умов середньосерійного виробництва. Як відомо заготовка у вигляді прокату характеризується наявністю великих напусків і припусків, що вимагає використання додаткових ресурсів під час подальшого оброблення заготовки на верстатах. Оскільки в перспективному технологічному процесі запропоновано використання верстатів з ЧПК, ефективність їх використання для видалення великих об'ємів напусків є неефективним. Водночас точність та якість поверхонь прокату є невисокою. За маси деталі 139 кг та маси заготовки-прокату 261 кг коефіцієнт використання матеріалу становить

$$K_{в.м1} = 139 / 261 = 0,53 < 0,7,$$

де 0,7 – нормативний коефіцієнт використання матеріалу [3].

Для перспективного технологічного процесу виготовлення деталі пропонується розглянути альтернативний спосіб одержання заготовки – поковка штампуванням на КГШП. Штампування є досить продуктивним процесом, що відповідає вимогам серійного виробництва. Поковки, одержувані штампуванням на КГШП мають мінімальні об'єми напусків і припусків. Точність розмірів та якість поверхонь поковки наближається до точності та якості поверхонь, одержуваних чорновим лезовим обробленням. За попередніми розрахунками маса поковки становить 180 кг. В результаті коефіцієнт використання матеріалу становить

$$K_{в.м2} = 139 / 180 = 0,77 > 0,7.$$

Коефіцієнт використання матеріалу поковки перевищує нормативний коефіцієнт 0,77, що є технологічною ознакою.

Отже, за технологічними ознаками одержання заготовки у вигляді поковки штампуванням на КГШП є ефективнішим ніж одержання заготовки у вигляді круглого прокату.

Визначення розмірів, припусків і допусків на розміри поковки виконаємо згідно з рекомендаціями [5]:

- T = 4 – клас точності;
- C = 2 – ступінь складності;
- M = 2 – група сталі;
- вихідний індекс – 18.

Розрахунок розмірів поковки наведений в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Визначення розмірів заготовки, у міліметрах

Характер поверхні	Ra, мкм	Припуск			Допуск	Розмір заготовки		Фактичний
		Основний	Додатковий	Загальний		Розрахунковий	Прийнятий	
d140	0,8	3,5	0,7+1,6	5,7	$5,0^{+3,3}_{-1,7}$	$151,4^{+3,3}_{-1,7}$	$151^{+3,3}_{-1,7}$	5,5
L1787	6,3	5,7	0,7+1,6	8	$10,0^{+6,7}_{-3,3}$	$1803^{+6,7}_{-3,3}$	$1803^{+6,7}_{-3,3}$	8
d115	6,3	3,2	0,7+1,6	5,5	$5,0^{+3,3}_{-1,7}$	$125^{+3,3}_{-1,7}$	$125^{+3,3}_{-1,7}$	5,5
d80	1,6	3	0,7+1,6	5,3	$4,5^{+3,0}_{-1,5}$	$90,6^{+3,0}_{-1,5}$	$91^{+3,0}_{-1,5}$	5,5
M125	3,2	3,2	0,7+1,6	5,5	$5,0^{+3,3}_{-1,7}$	$136^{+3,3}_{-1,7}$	$136^{+3,3}_{-1,7}$	5,5

Відповідно таблиці 5.1 розробляємо ескіз заготовки (див. рисунок 2.1).

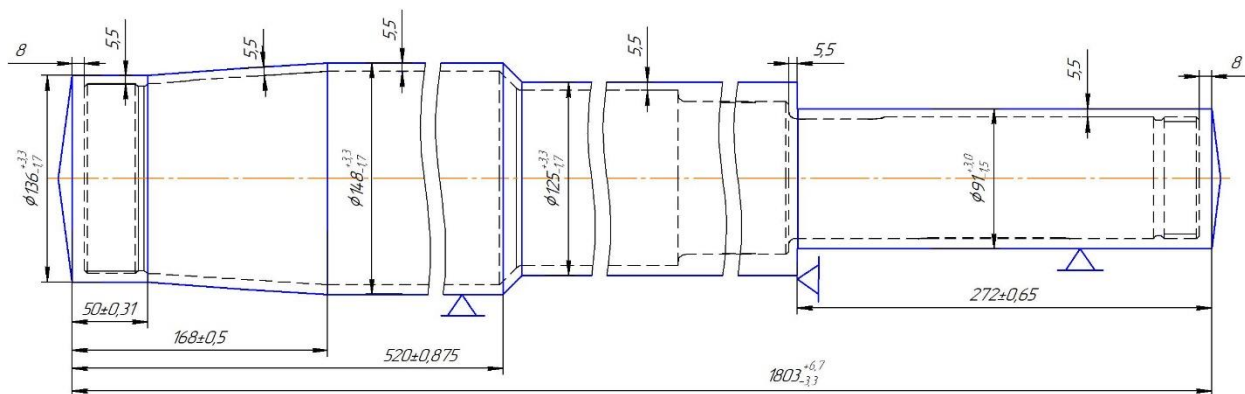


Рисунок 2.1 – Ескіз поковки

Порівняльний розрахунок собівартості одержання прокату та поковки був виконаний з використанням програми комп'ютерної алгебри PTC MathCAD та наведений в додатку В. За результатами розрахунку ефективнішим способом одержання заготовки є поковка штампуванням на КГШП (собівартість прокату становить 16640 грн, поковки – 10220 грн), що підтверджує обґрунтування за технологічними ознаками.

## 2.3 Аналіз горизонтально-розточувальної операції

### 2.3.1 Аналіз схеми базування та закріплення заготовки

На операції горизонтально-розточувальній 040 виконується оброблення глухого циліндричного отвору  $\text{Ø}48\text{H}14$ , різі  $\text{M}52 \times 1,5\text{-}7\text{H}$ , канавки під вихід різі та фаски  $2 \times 45^\circ$ . Найбільш розвиненими поверхнями, що претендують на роль технологічних баз є циліндричні поверхні  $\text{Ø}140,01\text{f}7$  та  $\text{Ø}80,01\text{h}9$ . Вони мають правильну циліндричну форму та велику протяжність, що дозволяє забезпечити стійке положення заготовки за умови базування в опорних призмах.

Базування заготовки в опорних призмах позбавляє заготовку 4-х ступенів вільності: реалізується подвійна напрямна база (див. рисунок 2.2, таблиці 2.3 та 2.4). Для позбавлення заготовки можливості поступального руху пропонується застосувати упор в один з торців заготовки.

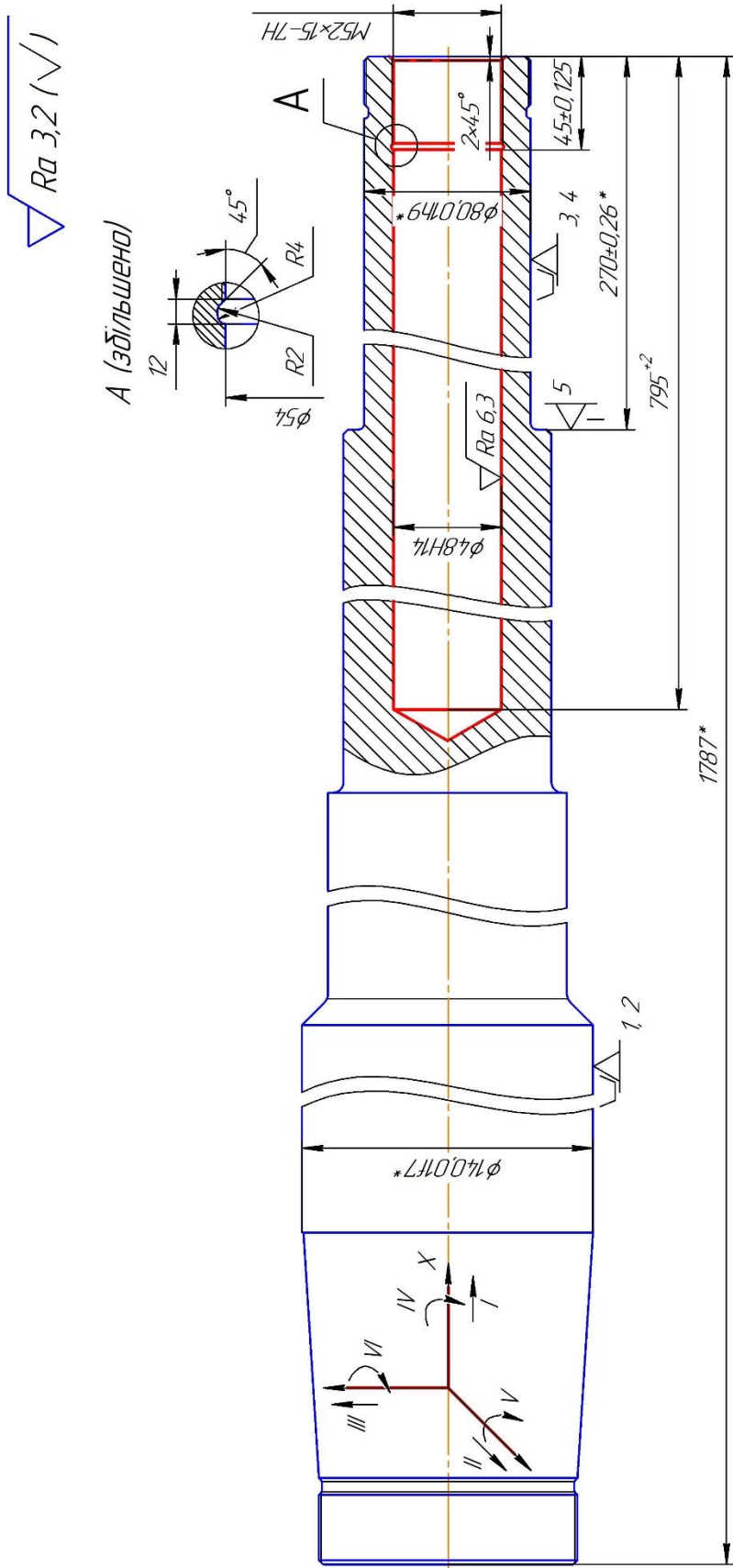


Рисунок 2.2 – Схема базування заготовки на горизонтально-розточувальній операції



Таблиця 2.3 – Таблиця відповідності

Зв'язки	Ступені свободи	Найменування бази
1, 2, 3, 4	II, III, V, VI	ПНБ
5	I	ОБ

Таблиця 2.4 – Матриця зв'язків

	X	Y	Z	Найменування бази
<i>l</i>	0	1	1	ПНБ
<i>α</i>	0	1	1	
<i>l</i>	1	0	0	ОБ
<i>α</i>	0	0	0	

Упор в торець позбавляє заготовку ще одного ступеня вільності: реалізується опорна база. Вакантним залишається обертання заготовки навколо центральної осі.

Для позбавлення заготовки переміщень під дією сил різання застосовуються механізовані прихвати, що притискають заготовку до опорних призм.

Аналіз схеми базування щодо забезпечення точності оброблюваних поверхонь. Похибка базування на глибину отвору  $795^{+2}$  дорівнює допуску на розмір  $l270$  (відстань від опорної бази до зовнішнього торця деталі).

Для забезпечення необхідної точності поверхонь потрібно, щоб виконувалася умова:

$$\varepsilon_{\delta} \leq \varepsilon_{\text{дон}},$$

де  $\varepsilon_{\delta}$  – дійсна похибка базування, мм;

$\varepsilon_{\text{дон}}$  – допустима похибка базування, мм.

Дійсну похибку базування заготовки за умови її установлення в опорних призмах визначимо за формулою [3]:

$$\varepsilon_{\sigma} = \frac{0,074}{2} \cdot \frac{1}{\sin(90^{\circ} / 2)} = 0,052 \text{ мм},$$

де  $T_D = 0,074$  мм – допуск на розмір  $\varnothing 80h9$  деталі,  $\alpha = 90^{\circ}$  – кут призми.

Перевіримо забезпечення точності розміру  $\varnothing 48H14$ :

$$\varepsilon_{\sigma} = 0,052 \text{ мм} < T_{D48H14}/2 = 0,31 \text{ мм}.$$

Таким чином точність позиціювання оброблюваного отвору  $\varnothing 48H14$  відповідно зовнішній циліндричній поверхні  $\varnothing 80h9$  буде забезпечено пропонованою схемою базування.

Для операційних розмірів 795H14 та 45H14 має місце похибка базування (технологічну базу розміщено за уступом в розмір 270 мм відносно правого зовнішнього торця заготовки, вимірювальну базу розміщено за зовнішнім торцем заготовки):

$$\varepsilon_{\sigma 795} = \varepsilon_{\sigma 45} = T_{270H14} = 1,3 \text{ мм},$$

$$\varepsilon_{\sigma 795} = 1,3 \text{ мм} < T_{795} = 2 \text{ мм},$$

$$\varepsilon_{\sigma 45} = 1,3 \text{ мм} > T_{45} = 0,62 \text{ мм}.$$

Отже пропонована схема базування забезпечує виконання розміру 795H14, але не забезпечує виконання розміру 45H14. Для забезпечення точності розміру 45H14 та за умови використання пропонованої схеми базування необхідно зменшити квалітет розміру 270 мм з 14-го до 12-го:

$$\varepsilon_{6795} = \varepsilon_{645} = T_{270H12} = 0,52 \text{ мм},$$

$$\varepsilon_{645} = 0,52 \text{ мм} < T_{45} = 0,62 \text{ мм}.$$

В результаті запропонована схема базування забезпечує виконання і розміру 45Н14.

### 2.3.2 Обґрунтування вибору металорізального обладнання

В базовому технологічному процесі на горизонтально-розточувальній операції використовується верстат моделі 2650. Цей верстат є морально та фізично застарілим, хоча його характеристики загалом дозволяють забезпечити виконання необхідних технічних вимог під час оброблення заготовки. Верстат має досить великий робочий стіл для розміщення такої габаритної заготовки та є досить потужним, дозволяє реалізувати всі необхідні технологічні методи оброблення поверхонь (свердління, розточування, нарізання різі тощо).

Для оброблення заготовки на горизонтально-розточувальній операції 040 перспективного технологічного процесу як альтернатива пропонується сучасний горизонтально-розточувальний верстат моделі КНВ130. Цей верстат має подібні до верстата 2650 технічні характеристики але на додаток має систему цифрової індикації, що покращує умови роботи працівника та сприяє стабілізації в забезпеченні точності оброблюваних поверхонь, підвищує продуктивність операції загалом. Основні характеристики верстата КНВ130 наведені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Основні технічні характеристики верстата КНВ130

Найменування характеристики	Величина
Діаметр шпинделя, мм	130
Конус шпинделя	Metric 80
Габарити поворотного стола, мм	1800×1400
Потужність головного шпинделя, кВт	15
Т-пази, мм	28
Кількість Т-пазів	9
Переміщення за віссю X, мм	1600
Переміщення за віссю Y, мм	1400
Переміщення за віссю Z, мм	2000
Діапазон частот обертання шпинделя, об/хв	4–800

### 2.3.3 Обґрунтування вибору верстатного пристрою, різального та контрольньо-вимірювального інструменту

Враховуючи значну довжину заготовки пропонується використовувати спеціальний верстатний з установчими елементами у вигляді опорних призм під циліндричні поверхні  $\varnothing 140$  та  $\varnothing 80$  з плоским упором в торець згідно зі схемою базування, наведеною на рисунку 2.2. Для закріплення заготовки з метою підвищення продуктивності та стабілізації точності оброблення поверхонь заготовки пропонується використовувати механізований (пневматичний) привід закріплення. Проектування верстатного пристрою буде розглянуто в п. 2.4.

Для оброблення глухого отвору  $\varnothing 48H14$  пропонується використовувати два спеціальних свердла діаметрами 24 та 48 мм. Матеріал свердла – швидкорізальна сталь Р6М5 зі зносостійким покриттям з TiN.

Для розточування канавки під вихід різи – різець розточувальний канавковий 035-2128-0525 з твердосплавною пластиною Т15К6 за формою канавки.

Для розточування фаски – різець розточувальний К01.4982.000-10 з ромбічною твердосплавною пластиною Т15К6.

Для розточування різі M52×1,5-7H – різець розточувальний різьбовий K01.4957.000-02 з ромбічною твердоспавною пластиною T15K6.

Контрольно-вимірювальний інструмент:

- штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ДСТУ EN ISO 13385-1:2018;
- глибиномір спеціальний L795;
- калібр спеціальний канавковий;
- пробка 8222-0163 7H (ПР) ГОСТ 17759-72.
- пробка 8222-1163 7H (НЕ) ГОСТ 17760-72.
- зразки шорсткості ГОСТ 9378-93.

### 2.3.4 Визначення режимів різання та технічне нормування операції

Режими різання на переходи горизонтально-розточувальної операції визначимо згідно з рекомендаціями [6] та наведемо їх в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Режими різання на операції 040 горизонтально-розточувальній

Опис переходу	Режими різання					Норми часу			
	Глибина різання $t$ , мм	Кількість проходів $i$	Подача $S$ , мм/об	Частота обертання шпинделя $n$ , об/хв	Швидкість різання $V$ , м/хв	Основний час $T_o$ , хв	Допоміжний час $T_d$ , хв	Штучний час $T_{шт}$ , хв	Підготовчо-завершальний час $T_{пз}$ , хв
Свердлити отвір Ø24H14	12,0	1	0,1	400	30,1	20,0	7,72	52,95	19,0
Свердлити отвір Ø48H14	12,0	1	0,2	200	30,1	20,0			
Розточити фаску в розмір 2×45°	2,0	1	0,2	630	110,8	0,05			
Розточити отвір Ø52	2,0	1	0,2	630	102,9	0,38			
Розточити канавку b3	3,0	1	0,1	630	102,8	0,06			
Розточити різьбовий отвір M52×1,5-7H	-	8	-	315	51,4	0,82			
Всього	-					41,31			

## 2.4 Проектування верстатного пристрою для базування та закріплення заготовки на горизонтально-розточувальній операції

Відповідно до пропозицій щодо удосконалення базового технологічного процесу виготовлення штока необхідно спроектувати верстатний пристрій з механізованим приводом закріплення заготовки для оброблення заготовки на операції 040 горизонтально-розточувальній (див. таблицю 2.1).

Застосування спеціального пристрою з механізованим приводом дає змогу стабілізувати точність оброблення поверхонь заготовки, зменшити трудомісткість операції, підвищити безпеку праці, поліпшити умови праці робітників, використовувати робочих нижчої кваліфікації, знизити собівартість виготовлення деталі загалом.

Оброблення заготовки здійснюється на горизонтально-розточувальному верстаті моделі КНВ130 (див. таблицю 2.5) відповідно до схеми базування, наведеної на рисунку 2.2. Під час оброблення центрального отвору формуються лінійні розміри L75H14, L45H14 та L45H14, що мають відповідати 14-му квалітету точності, шорсткість поверхонь має відповідати рівню 6,3 мкм за критерієм Ra.

Відповідно до схеми базування (див. рисунок 2.2) заготовка позбавлена 5-ти ступенів вільності, вакантним залишається лише її обертання навколо центральної осі. Для базування заготовки використовуються установчі елементи у вигляді опорних призм та плоского упору.

Розрахунок сил закріплення заготовки.

За умови дії на заготовку крутного моменту  $M_{кр}$  та осьової сили  $P_o$ , викликаних свердлінням, сила закріплення заготовки буде визначатися сумою:

$$P_3 = P_{31} + P_{32},$$

де  $P_{31}$  та  $P_{32}$  – сили закріплення заготовки, викликані відповідно дією крутного моменту  $M_{кр}$  та осьової сили  $P_o$ .

З умови не повертання заготовки для циліндричної заготовки з діаметром бази  $D$  встановленої в призмі з кутом  $\alpha$  і навантаженої крутним моментом  $M_{кр}$  силу закріплення  $P_{з1}$  визначимо за формулою

$$P_{з1} = \frac{2 \cdot K \cdot M_{кр}}{D \cdot \left( f_2 + \frac{f_1}{\sin \frac{\alpha}{2}} \right)},$$

де  $K$  – коефіцієнт запасу, що розглядається для забезпечення надійного закріплення заготовки. Беремо  $K = 2,5$  [3];

$M_{кр}$  – крутний момент, що діє на заготовку під час свердління. За результатами попередніх розрахунків беремо  $M_{кр} = 28$  Н·м;

$D$  – діаметр заготовки, беремо  $D = 0,08$  м;

$f_1, f_2$  – коефіцієнти тертя відповідно в місцях контакту заготовки з опорами і затискними елементами. Беремо  $f_1, f_2 = 0,16$  [3].

В результаті маємо

$$P_{з} = \frac{2 \cdot 2,5 \cdot 28}{0,080 \cdot \left( 0,16 + \frac{0,16}{\sin \frac{90^\circ}{2}} \right)} = 5028 \text{ Н.}$$

З умови нерухомості циліндричної заготовки діаметром бази  $D$  встановленої в призмі з кутом  $\alpha$  і навантаженої осьовою силою  $P_0$  силу закріплення  $P_{з2}$  визначимо за формулою

$$P_3 = \frac{K \cdot P_o}{f_1 + \frac{f_2}{\sin \frac{\alpha}{2}}}$$

За попередніми розрахунками осьова сила під час свердління становить  $P_o = 2931$  Н. В результаті маємо

$$P_3 = \frac{2,5 \cdot 2931}{0,16 + \frac{0,16}{\sin \frac{90^\circ}{2}}} = 6838 \text{ Н.}$$

Тоді сумарна сила закріплення заготовки становить

$$P_3 = 5028 + 6838 = 11866 \text{ Н.}$$

Вибір типу і розрахунок параметрів силового приводу.

У зв'язку з великою довжиною заготовки для її надійного закріплення беремо два пневмоприводи (необхідну силу закріплення ділимо на два). Оскільки в спроектованому пристрої застосовується передаточний механізм підсилювача величини сили затиску заготовки у вигляді прихвата важільного типу (див. рисунок 2.3), силу затиску визначимо за формулою [3]:

$$Q = \frac{\pi(D+d)^2 \cdot p \cdot \eta}{16} - Q_1$$

де  $l_1, l_2$  – плечі прихвата;

$Q_1 = 150$  Н – зусилля зворотної пружини;

$\eta = 0,9$  – коефіцієнт корисної дії;

$p = 0,4$  МПа – тиск повітря у пневмережі;

$d = 0,7D$  – діаметр диску пневмокамери.



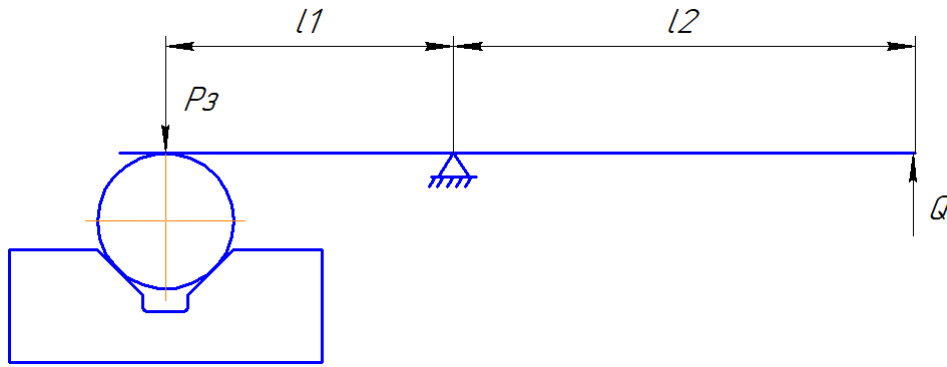


Рисунок 2.3 – Схема дії важільного прихвата

Відповідно до запропонованої схеми закріплення заготовки (див. рисунок 2.3) запишемо рівняння рівноваги моментів, діючих за використання важільного прихвата:

$$P_3 \cdot l_1 = Q \cdot l_2.$$

З конструктивних міркувань беремо  $l_2 / l_1 = 2$ .

В результаті

$$Q = P_3 \cdot l_1 / l_2 = 0,25 \cdot P_3 = 11866 \cdot 1/4 = 2966,5 \text{ Н.}$$

Діаметр пневмокамери визначимо за формулою

$$D = \frac{\sqrt{\frac{16(Q + Q_1)}{\pi \cdot p \cdot \eta}}}{1,7} = \frac{\sqrt{\frac{16(2966,5 + 150)}{\pi \cdot 0,4 \cdot 0,9}}}{1,7} = 116 \text{ (мм).}$$

Беремо найближчий більший стандартний діаметр пневмокамери  $D = 125$  мм. Водночас діаметр диска пневмокамери  $d = 0,7 \cdot D = 0,7 \cdot 125 = 87,5$  мм.

В результаті фактичне зусилля на штоку пневмокамери становить

$$Q = \frac{\pi(1,7 \cdot 125)^2 \cdot 0,4 \cdot 0,9}{16} - 150 = 3041,9 \text{ (Н)}.$$

Фактична сила закріплення заготовки становить

$$P_{з.ф} = Q \cdot 4 = 3041,9 \cdot 4 = 12167,6 \text{ Н}.$$

Розрахунок верстатного пристрою на точність.

До розрахункових параметрів варто віднести точність взаємного розміщення основних та допоміжних конструкторських баз пристрою, а саме відхилення від паралельності робочої поверхні опорних призм, що формує подвійну направляючу базу при базуванні заготовки, відносно опорної поверхні плити верстатного пристрою (якою пристрій встановлюється на стіл верстата). Цей параметр є однорідним з похибкою, обумовленою допустимим відхиленням від перпендикулярності оброблюваних отворів:

$$T_{\perp} = 0,3 \cdot T_{\varnothing 48H14} = 0,3 \cdot 0,31 = 0,093 \text{ мм}.$$

Визначимо допустиму похибку виготовлення верстатного пристрою за формулою:

$$E_{np} = T_{\perp} - K_m \sqrt{(K_{m1} \cdot \varepsilon_{\delta})^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_n^2 + \varepsilon_{3n}^2 + (K_{m2} \cdot \omega)^2 + \varepsilon_{noz}^2},$$

де  $K_T$  – коефіцієнт враховуючий можливе відхилення розсіювання значень складових величин рівняння від нормального закону розподілення,  $K_T = 1,2$ ;

$K_{T1}$  – коефіцієнт враховуючий зменшення граничних значень похибки базування при роботі на налагоджувальних верстатах,  $K_{T1} = 0,85$ ;

$\varepsilon_{\delta}$  – похибка базування, не впливає на формування похибки паралельності,  $\varepsilon_{\delta} = 0$  мкм;

$\varepsilon_3$  – похибка закріплення, не впливає на формування похибки паралельності, тому що сили закріплення розподіляються симетрично,  $\varepsilon_6 = 0$  мкм;

$\varepsilon_y$  – похибка установлення, не впливає на формування похибки паралельності,  $\varepsilon_y = 0$  мкм;

$\varepsilon_{II}$  – похибка встановлення та перекіс інструменту на верстаті.  $\varepsilon_{II} = 10$  мкм;

$\varepsilon_{3H}$  – похибка яка утворюється під час зношення робочих частин пристосування, так як зношення рівномірне, то воно не впливає на похибку паралельності,  $\varepsilon_6 = 0$  мкм;

$K_{T_2}$  – коефіцієнт враховуючий ймовірність появи похибки обробки,  $K_{T_2} = 0,6$ ;

$\omega$  – середня економічна точність обробки,  $\omega = 10$  мкм;

$\varepsilon_{\text{поз}}$  – похибка позиціонування верстатного пристрою на плиті. Так як ця похибка не впливає на похибку паралельності,  $\varepsilon_{\text{поз}} = 0$  мкм.

$$E_{np} = 93 - 1,2 \sqrt{(0,85 \cdot 0)^2 + 0^2 + 0^2 + 10^2 + 0^2 + (0,6 \cdot 10)^2 + 0^2} = 79 \text{ мкм.}$$

Беремо найближчу стандартну величину допуску непаралельності – 60 мкм. З урахуванням сказаного наведемо на складальному кресленні пропонованого верстатного пристрою технічну вимогу «Відхилення від паралельності загальної для робочих поверхонь призм поз. 2 та 3 осі відносно опорної поверхні плити поз. 7 – не більше 0,06 мм».

*Будова верстатного пристрою.*

Базовою деталлю верстатного пристрою є плита поз. 7, на якій встановлюють дві призми поз. 2 та 3, які реалізують подвійну направляючу та опору поз. 16, що реалізує опорну базу під час базування заготовки.

В лівій та правій частинах плити поз. 2, розташовані пневмокамери односторонньої дії. Безштокові порожнини пневмокамер розташовані безпосередньо в плиті поз. 7, штокові порожнини утворені кришками поз. 15. Між кришками поз. 15, та плитою розміщені мембрани пневмокамер, які жорстко зв'язані з штоками.

Для фіксації заготовки передбачені прихвати поз. 3, у вигляді важеля. Коротке плече має спиратися на заготовку, а довге на шток (робоче положення). В центральній частині прихвата розташована стійка поз. 14, яка виконує функцію опори. В не робочому положенні прихват відвернутий від заготовки на 90°.

Для установки верстатного пристрою на столі верстата передбачені дві призматичні шпонки поз. 5, які привернуті до плити поз. 7 знизу гвинтами.

Для транспортування, переустановлення пристрою передбачені чотири рим-болти поз. 17, які привернуті до плити поз. 7 зверху в протилежних кутах.

#### *Принцип дії верстатного пристрою.*

Встановити заготовку на призми поз. 2 та 3 та на опору поз. 16 до контакту з циліндричною поверхнею. Розвернути прихвати в робоче положення (так, щоб довге плече прихвата розташовувалось над штоком пневмокамери, а коротке плече – над поверхнею заготовки). Подати стиснене повітря до безштокової порожнини пневмокамери. Стиснене повітря перемістить мембрану, яка в свою чергу підніме шток пневмокамери. За переміщення штока догори коротке плече прихвата опускається вниз. При цьому відбуватиметься затиск заготовки. Розкріплення заготовки здійснюється у зворотній послідовності.

## 2.5 Висновок

1. Запропонований перспективний технологічний процес виготовлення деталі з урахуванням нововведень, спрямованих на підвищення продуктивності виробництва, стабілізацію точності та якості оброблених поверхонь деталі, покращання умов праці робочих, зокрема через впровадження верстатів з ЧПК та механізованих верстатних пристроїв.

2. За результатами техніко-економічного обґрунтування вибрано раціональний спосіб одержання первинної заготовки – поковка штампуванням на КГШП.

3. Виконано детальний аналіз горизонтально-розточувальної операції з обґрунтуванням вибору раціональної схеми базування заготовки, раціонального верстата та засобів технологічного оснащення.

4. Для базування та закріплення заготовки на горизонтально-розточувальній операції спроектовано верстатний пристрій з пневматичним приводом закріплення заготовки. Розроблене складальне креслення верстатного пристрою. Правильність прийнятих проектно-конструкторських рішень пропонується перевірити шляхом дослідження спроектованого пристрою методами статичного та динамічного аналізу.

### РОЗДІЛ 3

## СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ ВЕРСТАТНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ БАЗУВАННЯ ТА ЗАКРІПЛЕННЯ ЗАГОТОВКИ НА ГОРИЗОНТАЛЬНО-РОЗТОЧУВАЛЬНІЙ ОПЕРАЦІЇ

Впродовж останніх десятиліть виробничий ринок характеризувався невеликим розміром виробничих партій, великим різноманіттям типів (конфігурацій) деталей, постійною еволюцією продукції [7].

Верстатний пристрій є невід'ємною частиною замкненої технологічної обробної системи, що забезпечує адаптацію різноманітних, часто складних за своєю конфігурацією виробів, до установчих елементів верстата. Проектування верстатного пристрою є складним багатофакторним процесом, оскільки його основним завданням є [8]:

- визначення положення оброблюваної заготовки в системі координат технологічної обробної системи (базування);
- збереження визначеного положення заготовки під дією статичних та динамічних навантажень;
- спрямування цих навантажень всередині потоків силової взаємодії.

Розв'язки зазначених завдань знаходяться в міждисциплінарній площині. Отже більшість проектних рішень приймається конструктором інтуїтивно, що вимагає від проектувальника значного досвіду та знань. У зв'язку зі складністю конструкції верстатного пристрою, як об'єкту проектування, оптимальні рішення часто не є очевидними. Водночас сучасні комп'ютерні методи досліджень дозволяють не лише швидко та якісно перевірити правильність прийнятих проектних рішень, а й запропонувати потенціальні шляхи оптимізації досліджуваної конструкції [8, 9, 10].

Важливим етапом перевірки спроектованої конструкції верстатного пристрою є дослідження її напружено-деформованого стану в умовах дії статичних навантажень [11].

Іншим напрямком оптимізації конструкцій верстатних пристроїв є забезпечення їх стійкої роботи в умовах динамічних навантажень [12, 13, 14, 15].

Останнім часом все більшу популярність в сфері оптимізації проєктних рішень набуває метод топологічної оптимізації (Topology Optimization). Топологічна оптимізація є корисними інструментами в руках проєктувальника, який може допомогти йому у пошуках глобального оптимуму конструкції та у виборі альтернативного проєктного рішення відповідно [9].

Розвитком ідей топологічної оптимізації є генеративний дизайн (Generative Design) – потужний інструмент, який дозволяє повністю використовувати потенціал адитивного виробництва [10, 16]. Оптимізація топології, вже встановлений підхід, вимагає початкової форми, з якої матеріал видаляється до досягнення бажаного результату. Генеративний дизайн представляє більш складний підхід, отримуючи кілька вхідних даних, таких як мета, обмеження, використаний матеріал і техніка виробництва, він пропонує низку можливих результатів. Роль дизайнера полягає у створенні форми компонента з нуля до вибору найкращого варіанту для конкретного застосування.

### 3.1 Статичний аналіз системи «верстатний пристрій-заготовка»

В розділі 2 цієї роботи спроектовано конструкцію верстатного пристрою для базування та закріплення заготовки на горизонтально-фрезерній операції технологічного процесу виготовлення «штока».

Для перевірки правильності прийнятих проєктних рішень виконаємо аналіз напружено-деформованого стану системи «пристрій-заготовка» за умов статичного навантаження, спричиненого силами та моментами різання та силами закріплення.

Дослідження напружено-деформованого стану системи «пристрій-заготовка» зручно виконувати з використанням універсального програмного засобу Ansys Workbench, що базується методі кінцевих елементів (МКЕ) [17]. Ansys існує і розвивається впродовж останніх 30 років, є досить популярним серед фахівців у сфері автоматизованих інженерних розрахунків (САПР або

САЕ) та рішення МКЕ лінійних та нелінійних, стаціонарних та нестаціонарних просторових завдань механіки деформованого твердого тіла та механіки конструкцій.

Для дослідження напружено-деформованого стану системи «пристрій-заготовка» скористаємося модулем Static Structural (Ansys).

Для виконання статичного дослідження в автоматизованій системі інженерного графічного дизайну SolidWorks було спроектовано твердотільну модель системи «пристрій-заготовка». Для підвищення продуктивності розрахунків скінчено-елементної моделі до твердотільної моделі SolidWorks увійшли лише основні елементи пристрою, що беруть участь у формуванні силового потоку між приводами затискання, заготовкою та установчими елементами пристрою: стіл, призми опорні, стійки, прихвати, гайки та шайби.

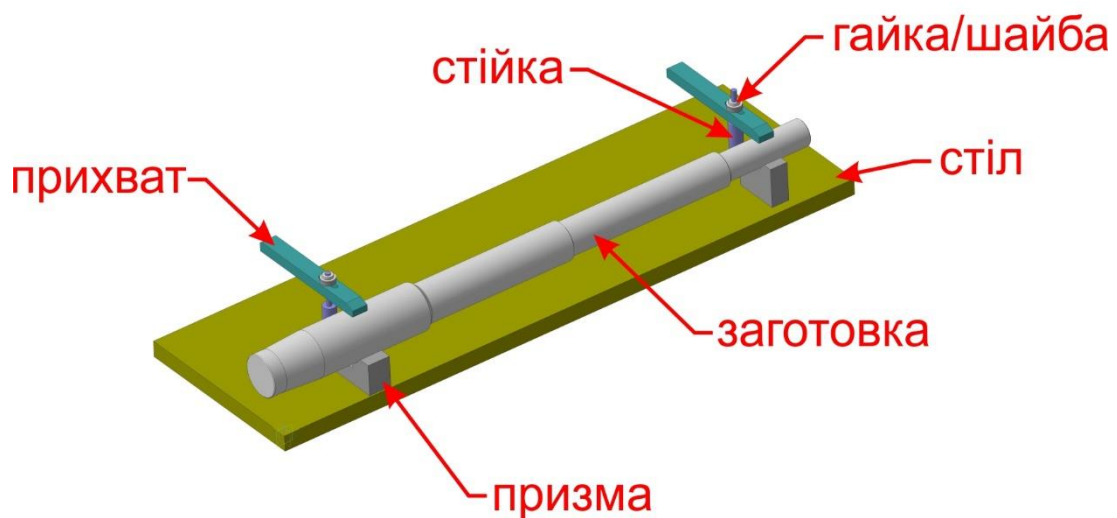


Рисунок 3.1 – Твердотільна модель системи «пристрій-заготовка»

Для дослідження системи «пристрій-заготовка» її твердотільна модель була імпортована в Ansys Workbench, модуль Geometry (див. рис. 3.2).



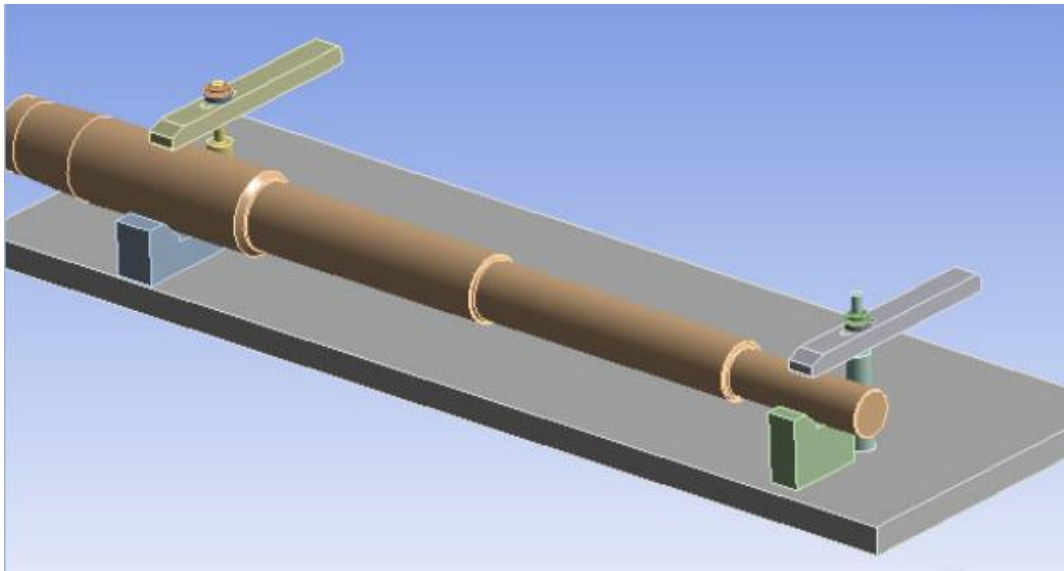


Рисунок 3.2 – Імпорт твердотільної моделі в Ansys Workbench,  
модуль Geometry

Для забезпечення адекватності результатів дослідження для моделі системи «пристрій-заготовка» були задані характеристики контактуючих поверхонь, зокрема, «прихват-заготовка», «заготовка-призма», «шайба-прихват» тощо. Так, для пар «заготовка-призма», «прихват-заготовка», задано характеристику сполучення «Тертя» (Frictional) з коефіцієнтом тертя 0,16 (див. рисунки 3.3, 3.4).

Для пари сферичних шайб задано характеристику «Тертя» (Frictional) з коефіцієнтом тертя 0,1.

Для пари «шайба-прихват» задано характеристику «Тертя» (Frictional) з коефіцієнтом тертя 0,16.

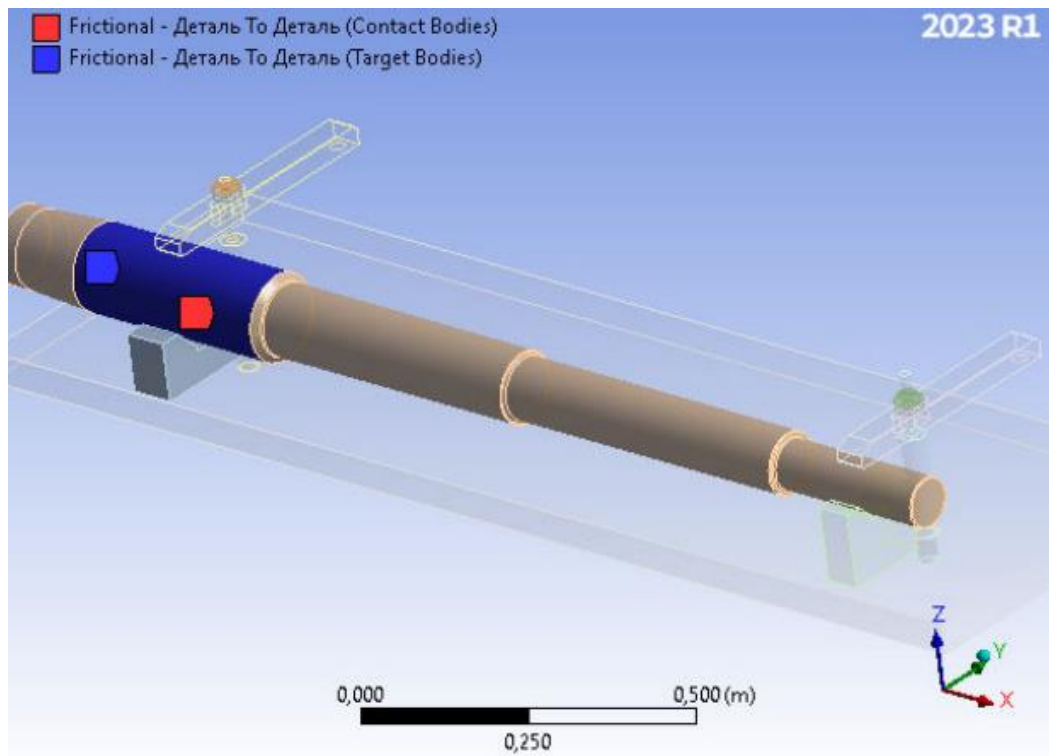


Рисунок 3.3 – Характеристика контакту сполучених поверхонь «заготовка-призма»

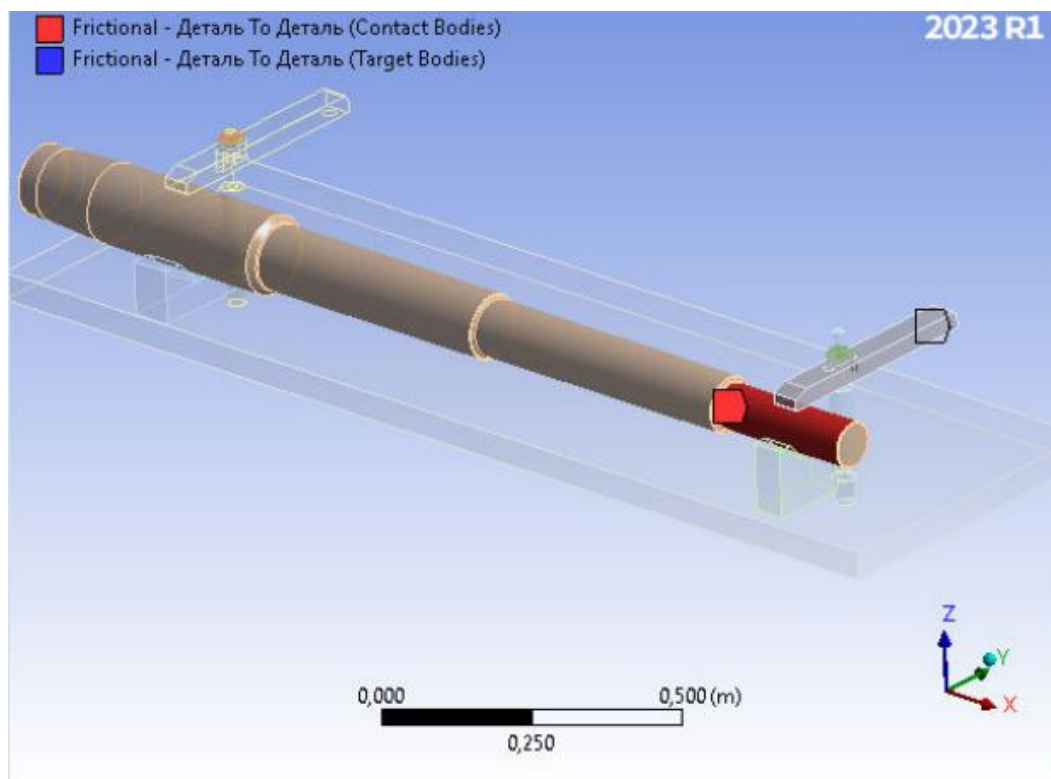


Рисунок 3.4 – Характеристика контакту сполучених поверхонь «прихват-заготовка»

Для пари «стійка-прихват» задано характеристику «Відсутність тертя» (Frictionless), див. рисунок 3.5.

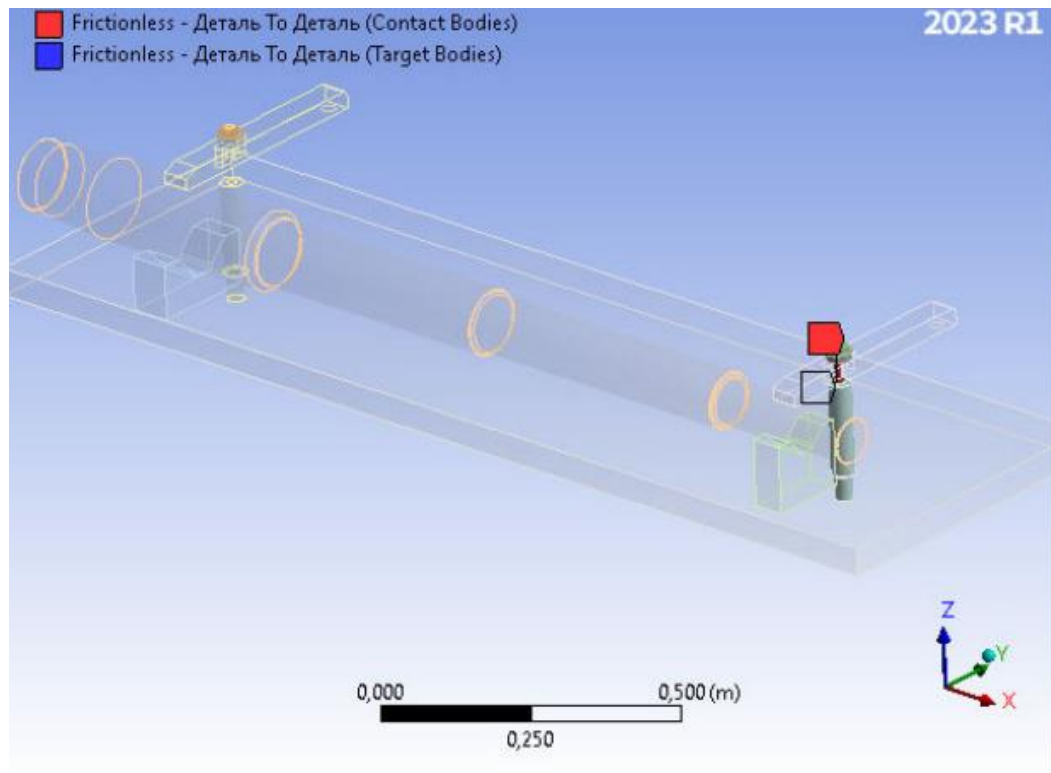


Рисунок 3.5 – Характеристика сполучення «стійка-прихват»

Характеристики матеріалів компонентів системи «пристрій-заготовка» прийняті за замовчуванням, як для середньовуглецевої конструкційної сталі (Structural Steel): «межа міцності за розтягування» – 460 МПа, «межа текучості за розтягування» – 250 МПа.

Скінчено-елементна сітка досліджуваної моделі було сформовано в автоматичному режимі: мінімальна довжина грані скінченого елемента становить 2,5 мм, кількість елементів – 9644 (див. рисунок 3.6).

Під час оброблення заготовки на горизонтально-розточувальній операції на неї з боку торця діє осьова складова сили різання в розмірі 2930 Н та момент різання в розмірі 28 Н·м. Сила та момент різання компенсуються силами закріплення, що формуються механізованими приводами закріплення (в моделі не розглянуті) через прихвати важільного типу. Сили, що формуються на штоках

приводів, в розмірі 3042 Н (див. рисунок 3.7), діють на плечі прихватів та передаються у вигляді сил закріплення на заготовку з коефіцієнтом передачі 2, що визначається різною довжиною плечей.

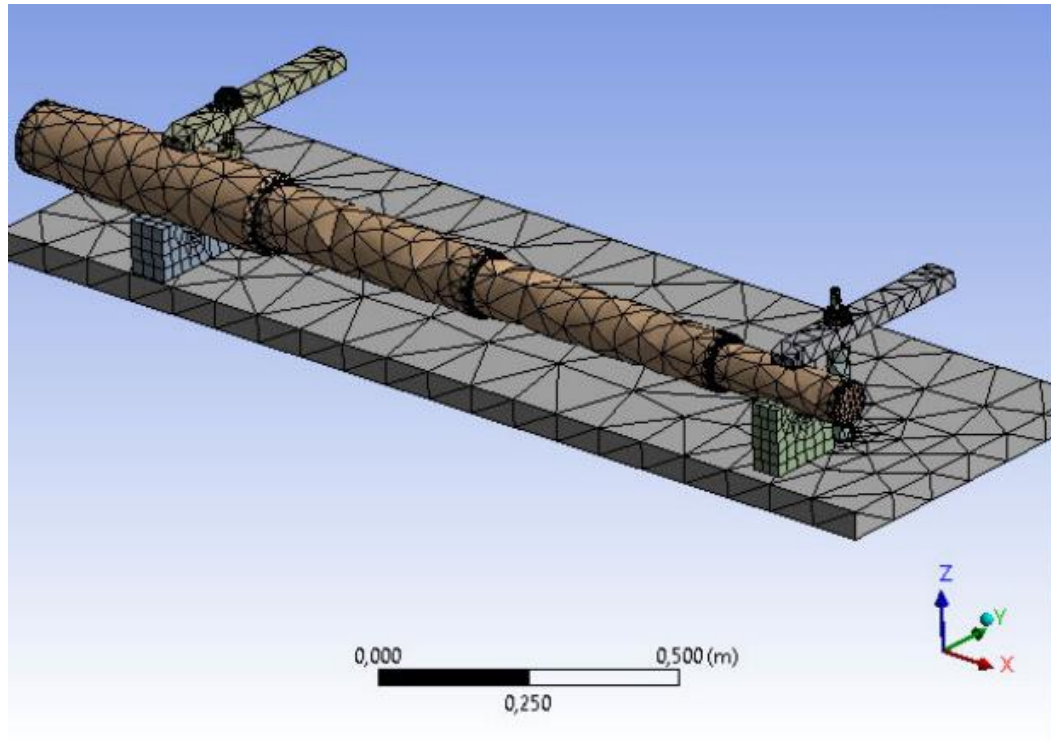


Рисунок 3.6 – Скінчено-елементна модель системи «пристрій-заготовка»

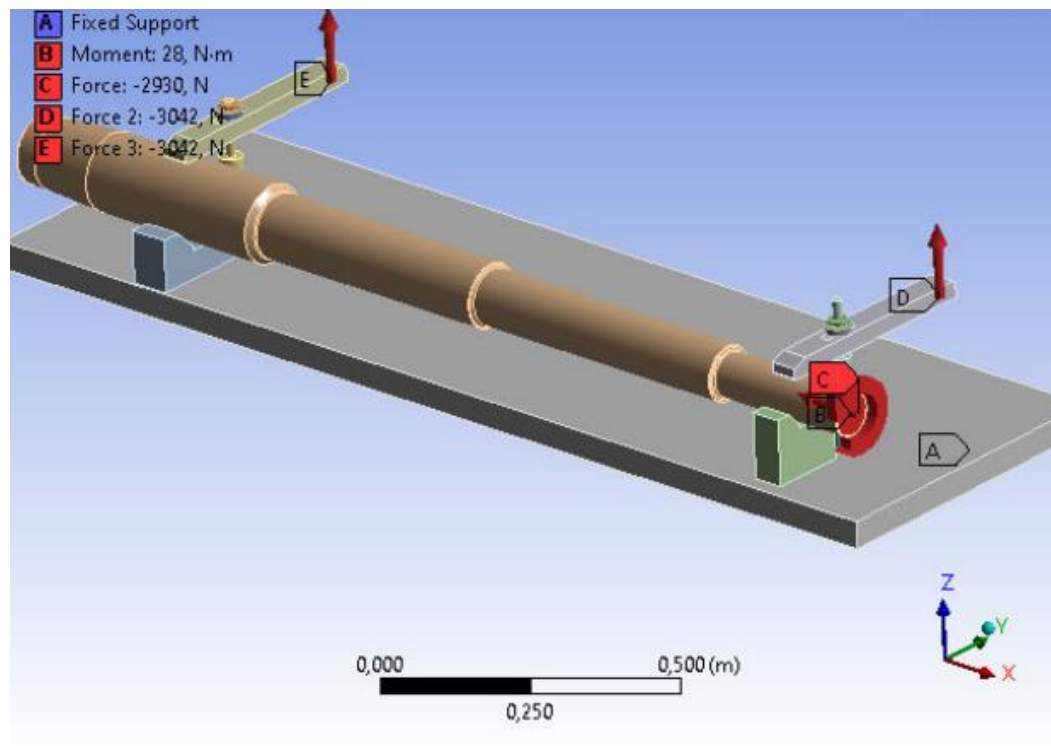


Рисунок 3.7 – Граничні умови моделі системи «пристрій-заготовка»

Однією з граничних умов є фіксована опора (Fixed Support), що характеризує абсолютно жорстке закріплення основи стола пристрою.

В результаті розрахунку представленої моделі були одержані епюри «загальних переміщень» (Total deformations) та «внутрішніх напружень» (Equivalent Stress).

Епюра «загальних переміщень» (див. рисунок 3.8) за прийнятих граничних умов та конфігурації моделі показала максимальний рівень переміщень на рівні 1,6 мм, характерний для зовнішнього торця довгого плеча прихвата.

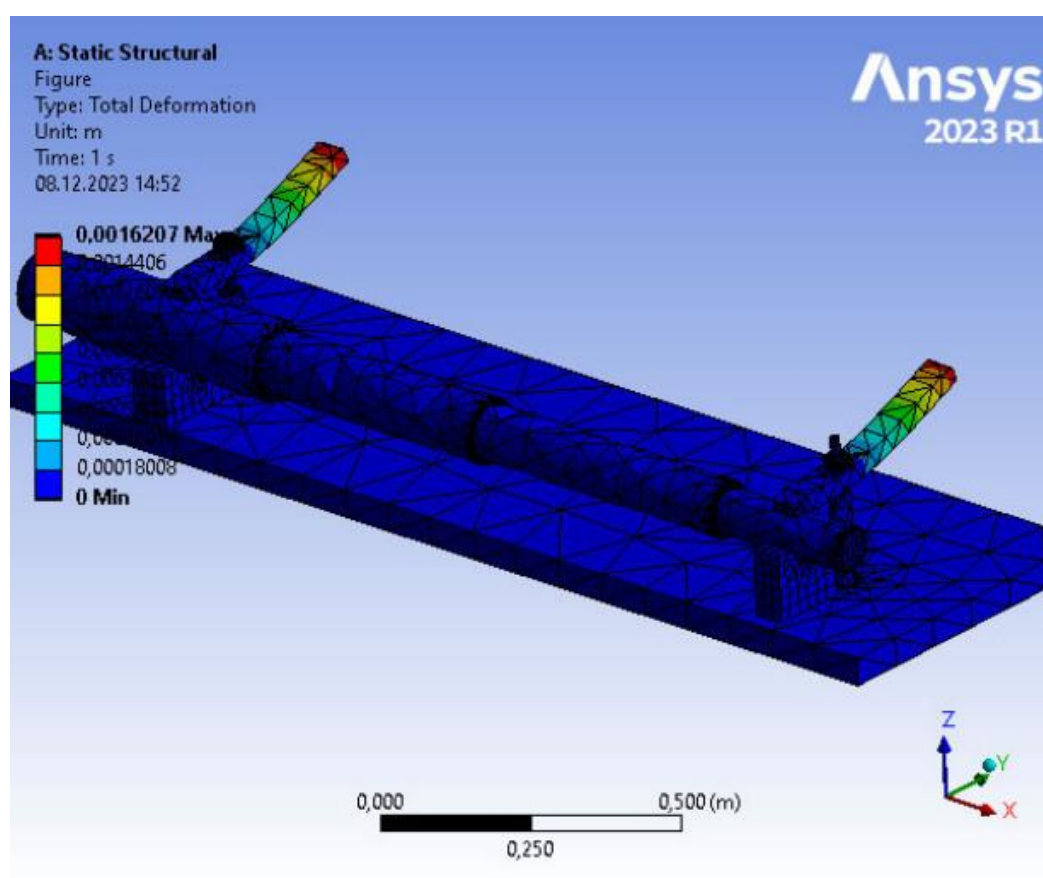


Рисунок 3.8 – Епюра «загальних переміщень» системи «пристрій-заготовка»

Епюра «внутрішніх напружень» (див. рисунки 3.9 та 3.10) за прийнятих граничних умов та конфігурації моделі показала максимальний рівень напружень на рівні 131 МПа, характерний для зони контакту між прихватом та сферичною шайбою.

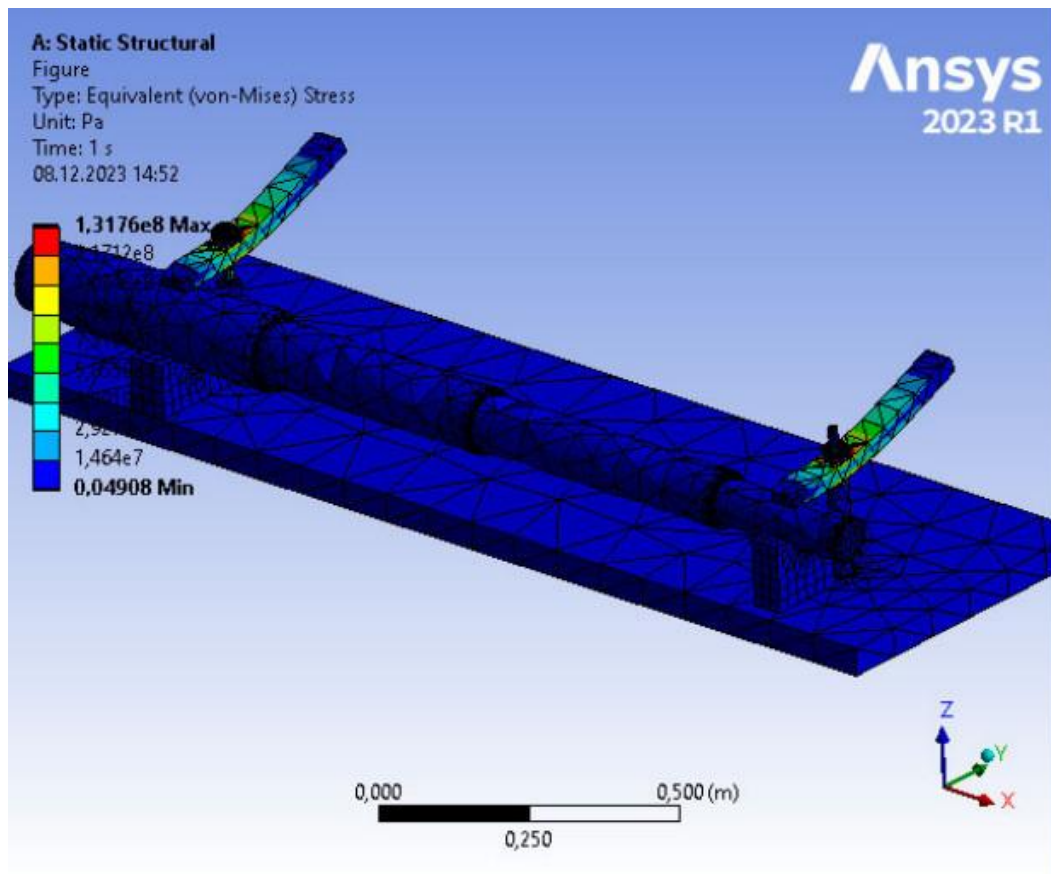


Рисунок 3.9 – Епюра «внутрішніх напружень» системи «пристрій-заготовка»

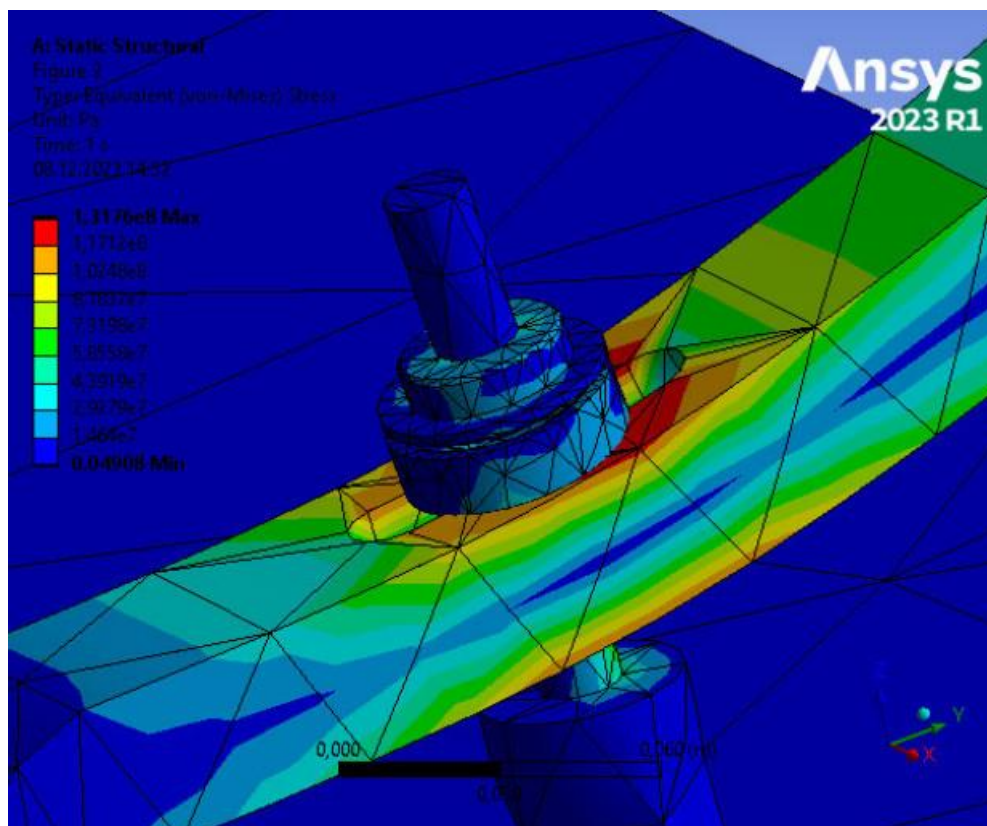


Рисунок 3.10 – Епюра «внутрішніх напружень» системи «пристрій-заготовка» в зоні контакту між прихватом та сферичною шайбою

Аналіз епюри «загальних переміщень» показав, що доволі велике переміщення (1,6 мм) зовнішнього торця довгого плеча прихвата є небажаним. Експертне оцінювання показало, що допустимим рівнем переміщень прихвата є величина, що не перевищує 0,5–0,6 мм.

Аналіз епюри «внутрішніх напружень» показав, що максимальна величина напружень (131 МПа), характерна для прихвата, не є небезпечною, оскільки її значення не перевищує межу текучості матеріалу прихвата, що становить 250 МПа.

В результаті було прийнято рішення про необхідність підвищення поперечної жорсткості конструкції прихвата з метою зменшення максимальної величини його переміщень до рівня 0,5–0,6 мм.

Очевидно, що поперечну жорсткість прихвата можна підвищити шляхом збільшення його поперечного перетину. В першу чергу це можна досягнути збільшенням висоти прихвата. Для визначення оптимальної конструкції прихвата було запропоновано дослідження системи «прихват-стійка» (див. рисунок 3.11).

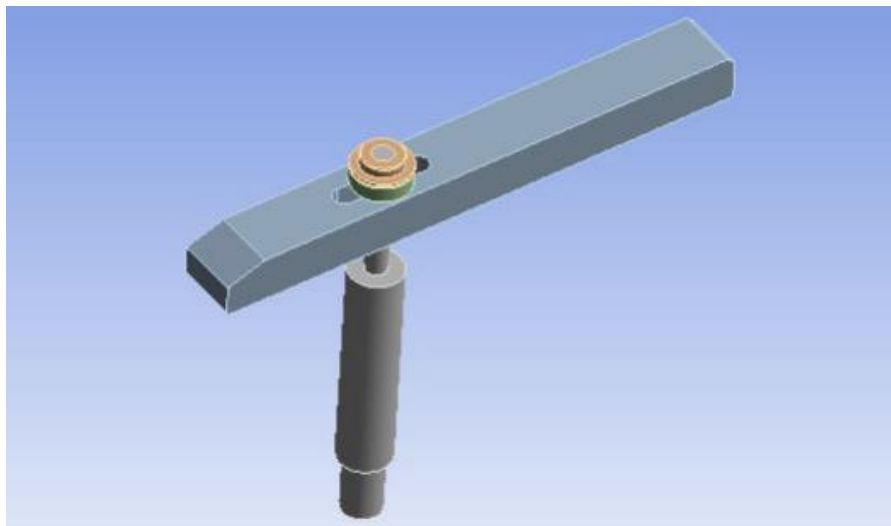


Рисунок 3.11 – Твердотільна модель системи «прихват-стійка»

Для досліджуваної системи «прихват-стійка» були прийняті такі граничні обмеження:

- а) фіксована опора – для нижньої частини стійки;
- б) сила 3042 Н – для довгого плеча прихвата;
- в) сила 6084 Н – для короткого плеча прихвата.

Силу 6084 Н було задано як реакцію опори, оскільки в системі «прихват-стійка» відсутня поверхня заготовки, на яку спирається (тисне) прихват в системі «пристрій-заготовка».

Первинне виконання (конструкція) прихвата має перетин з габаритами 48×32 мм з шириною паза 16 мм під стійку (див. рисунок 3.12).

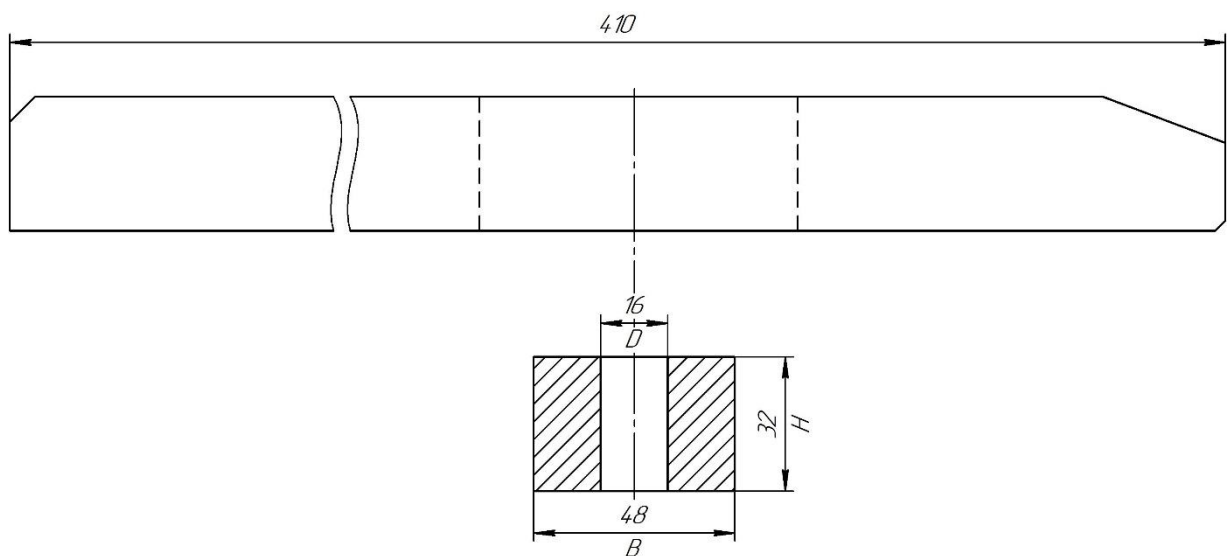


Рисунок 3.12 – Ескіз прихвата (первинне виконання (виконання А))

Потрібно зазначити, що до складу досліджуваної системи було додано стійку, попереднє експериментальне дослідження методами статичного аналізу показало, що з певним збільшенням поперечного перетину прихвата через збільшення висоти  $H$  максимальні напруження будуть характерні уже не для прихвата, а саме для стійки в її найтоншому перетині (див. рис. 3.13). В результаті, для зменшення максимального переміщення довгого плеча прихвата загалом потрібно також розглядати можливе збільшення поперечного перетину стійки (діаметр  $D$ ). Збільшення діаметра стійки  $D$  потребує збільшення ширини паза  $D$  в прихваті, що вимагає відповідного збільшення ширини прихвата  $B$ .



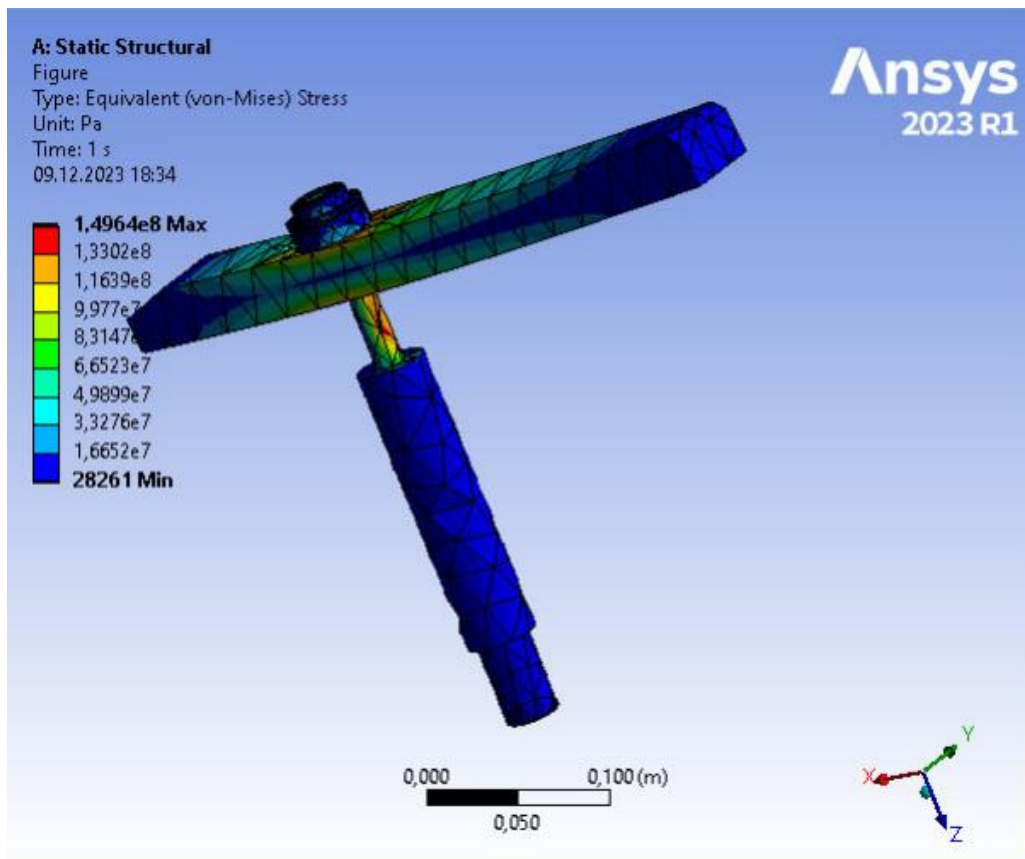


Рисунок 3.13 – Максимальне напруження в системі «прихват-стійка», характерне для стійки

В результаті проведення пошукового експериментального дослідження підібрані такі параметри системи «прихват-стійка», що задовольняють умовам не перевищення граничних величин загальних переміщень та внутрішніх напружень:  $H = 60$  мм,  $B = 68$  мм,  $D = 30$  мм (див. рисунок 3.14). За таких параметрів максимальні переміщення в системі становлять 0,45 мм, максимальні внутрішні напруження – 38,2 МПа.

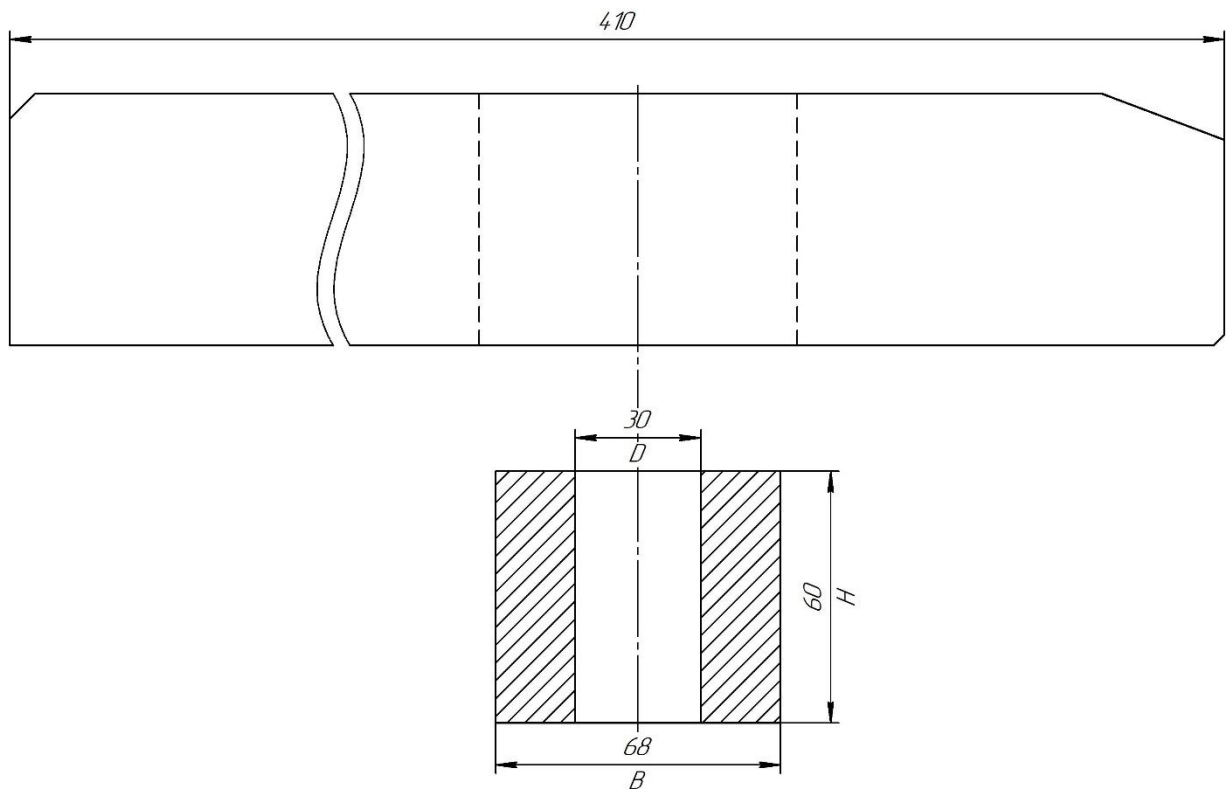


Рисунок 3.14 – Ескіз прихвата (посилене виконання (виконання В))

### 3.2 Топологічна оптимізація елементів системи «верстатний пристрій-заготовка»

Очевидно, таке збільшення поперечного перетину прихвата визначає збільшення і його маси з 4,564 кг до 11,762 кг. Таке збільшення маси прихвата є небажаним, враховуючи сучасні тенденції в машинобудуванні, спрямовані на зменшення матеріаломісткості виробів.

В результаті було запропоновано дослідження, спрямоване на пошук «оптимальних» параметрів прихвата з критерієм оптимальності у вигляді його мінімальної маси ( $m \rightarrow \min$ ).

Для мінімізації маси прихвата було запропоновано скористатись методом топологічної оптимізації, що реалізується модулем Structural Optimization програми Ansys Workbench.

Для наближення розрахункової моделі до реальних умов роботи прихвата були задані такі граничні умови:

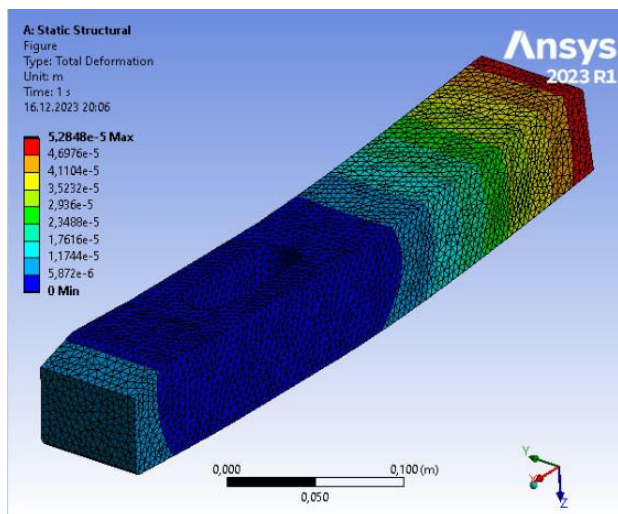
а) фіксована опора – для площини прихвата в зоні, що контактує з шайбою;

б) сила 3042 Н – для довгого плеча прихвата;

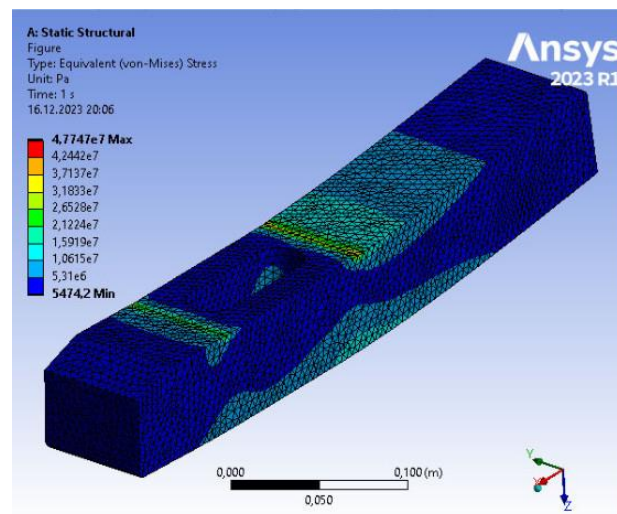
в) сила 6084 Н – для короткого плеча прихвата.

Для підвищення точності розрахунку моделі було побудовано скінченно-елементну сітку з розміром елементів – 5 мм.

Попередній розрахунок моделі в модулі Static Structural за прийнятих умов дозволив одержати епюри «загальних переміщень» (див. рисунок 3.15, а) та «внутрішніх напружень» (див. рисунок 3.15, б).



а)



б)

Рисунок 3.15 – Епюри: а – «загальних переміщень»,  
б – «внутрішніх напружень»

Серед граничних умов для пошуку шляхів топологічної оптимізації були також задані поверхні (об'єкти), що не підлягають коригуванню (Optimization Region). Як поверхні, що не підлягають коригуванню (Exclusion Region) були вибрані такі, що контактують з шайбою, заготовкою та штоком механізованого приводу (див. рисунок 3.16).

В параметрах модуля Structural Optimization було задано масу, яку потрібно зберегти (Type: Response Constraint, Response: Mass) – вибираємо

параметр Percent to Retain – 50 % (оптимізація повинна бути спрямована на зменшення маси виробу до 50% від початкової маси).

В результаті розрахунку одержано епюру «псевдощільності» (Topology Density), яка відповідає за наявність або відсутність матеріалу в розрахунковій області, див. рисунки 3.17–3.19 (Remove – матеріал рекомендовано вилучити, Marginal – матеріал рекомендовано вилучити або залишити на вибір, Keep – матеріал рекомендовано залишити).

Епюри, наведені на рисунках 3.17–3.19 одержані шляхом коригування параметру Retained Threshold. Поступове змінення цього параметру дозволяє побачити потенціальні шляхи структурно-параметричної оптимізації геометрії виробу за прийнятих обмежень.

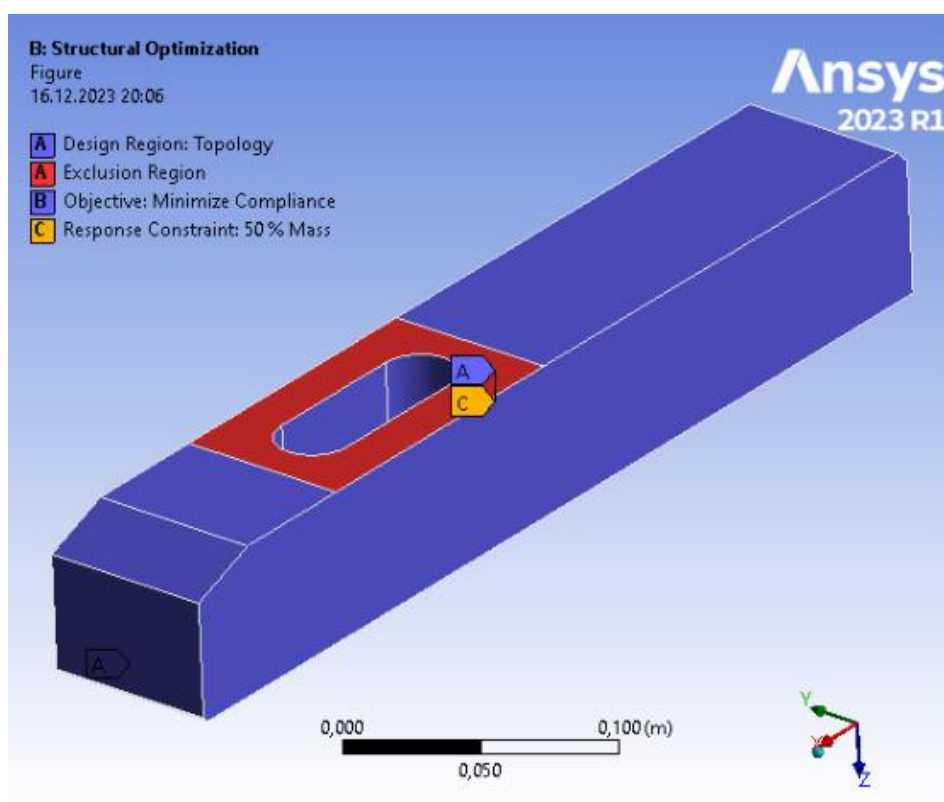


Рисунок 3.16 – Вибір поверхонь, що не підлягають коригуванню

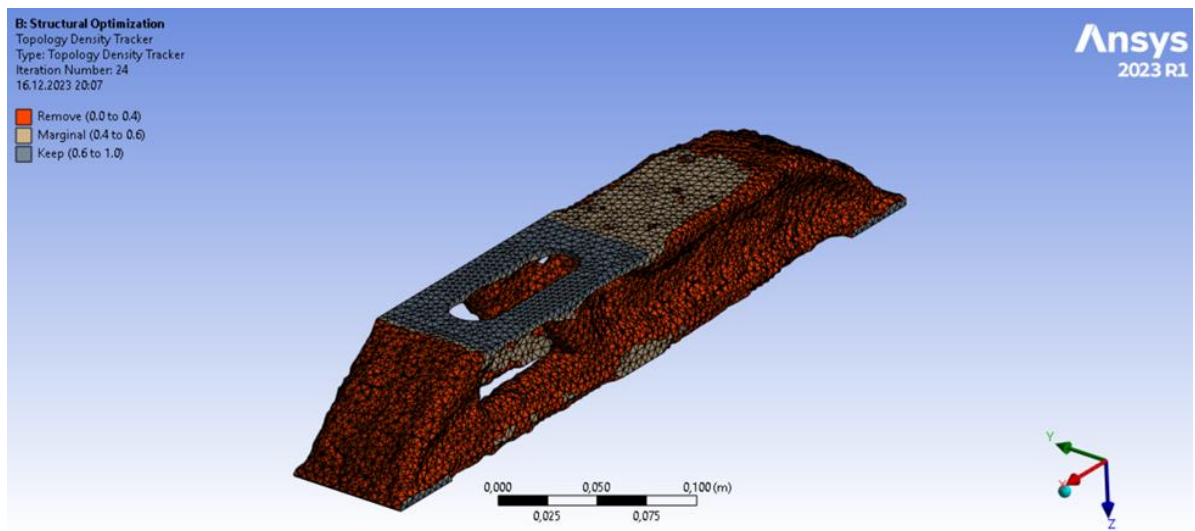


Рисунок 3.17 – Епюра псевдощільності (Retained Threshold – 0,4)

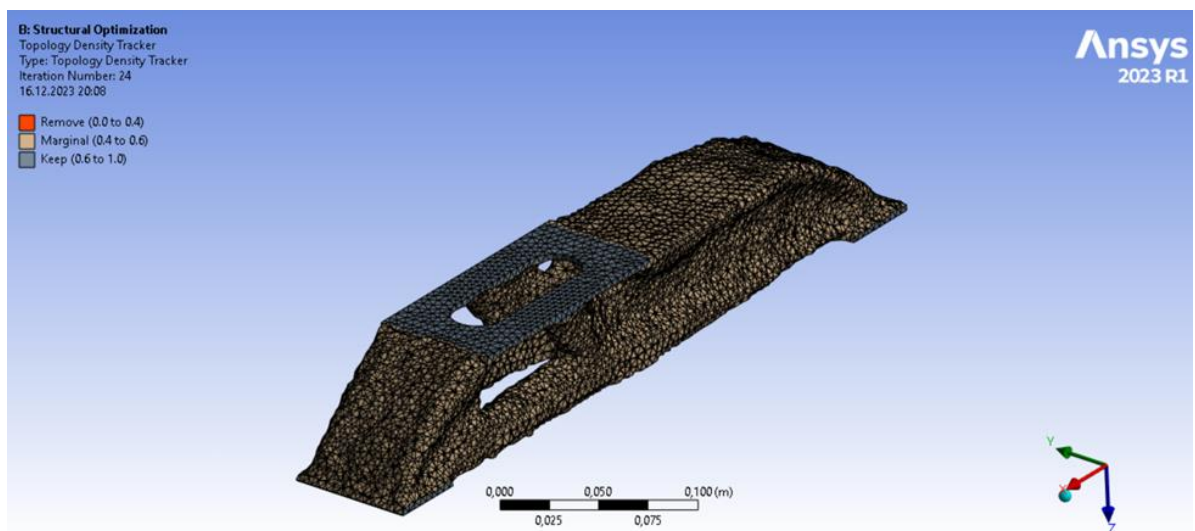


Рисунок 3.18 – Епюра псевдощільності (Retained Threshold – 0,5)

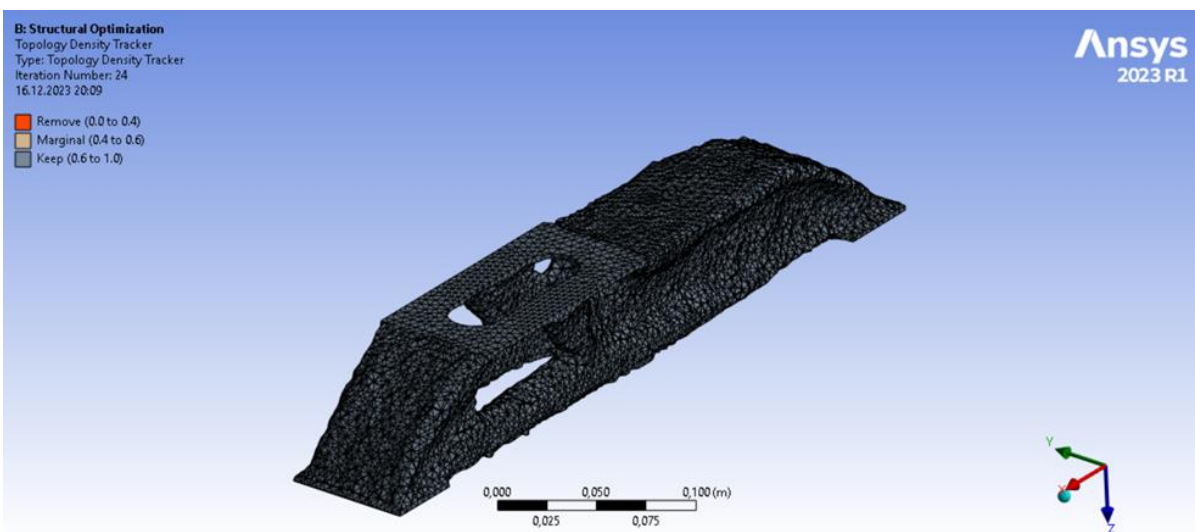


Рисунок 3.19 – Епюра псевдощільності (Retained Threshold – 0,5)

За результатами аналізу епюр 3.17–3.19 виходить, що одним зі шляхів оптимізації конструкції прихвата є утворення скосів (фасок), що з'єднують плоскі зони контакту прихвата з заготовкою, шайбою та штоком привода, а також утворення внутрішньої порожнини всередині конструкції. Виробництво прихвата з порожниною всередині можливе лише з використанням адитивних методів. Більш практичним варіантом є проектування в нижній частині прихвата поздовжнього паза. В результаті було запропоновано конструкцію прихвата, наведену на рисунку 3.20.

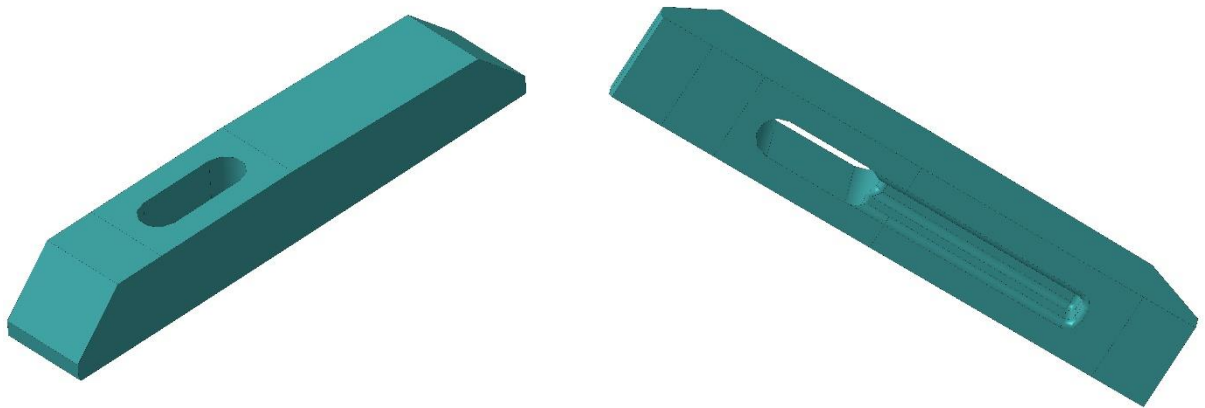
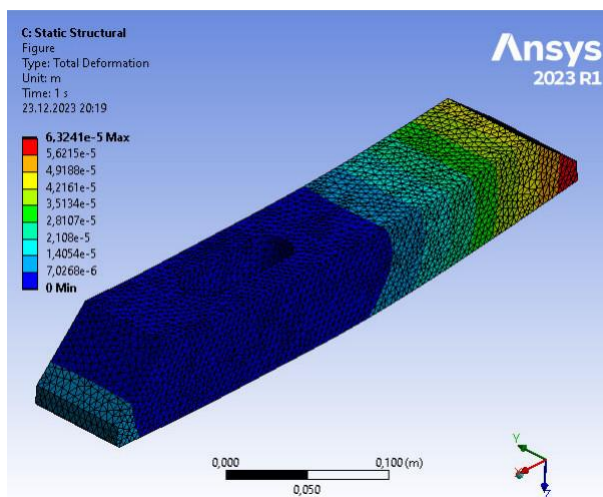
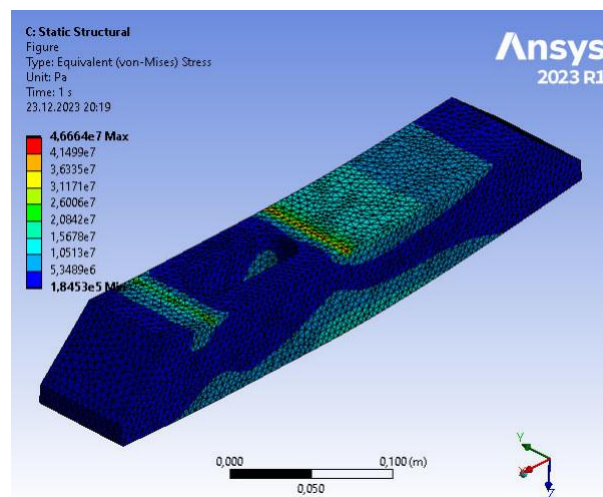


Рисунок 3.20 – Ескіз оптимізованої конструкції прихвата (виконання С)

Перевірочний статичний аналіз моделі прихвата в модулі Static Structural за прийнятих умов дозволив одержати епюри «загальних переміщень» (див. рисунок 3.21, а) та «внутрішніх напружень» (див. рисунок 3.21, б).



а)



б)

Рисунок 3.21 – Епюри: а – «загальних переміщень»,  
б – «внутрішніх напружень»

Порівняння результатів статичного дослідження для прихвата виконань В і С наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняльна таблиця результатів статичного дослідження прихвата

	Виконання В (рис. 3.15)	Виконання С (рис. 3.21)
Максимальна величина загальних переміщень, мм	0,053	0,063
Максимальна величина внутрішніх напружень, МПа	48	46
Маса прихвата, кг	11,808	10,177

Як видно з таблиці 3.1 запропонована за результатами топологічної оптимізації конструкція прихвата характеризується незначним (на 0,01 мм) збільшенням загальних переміщень та зменшенням (на 2 МПа) внутрішніх напружень. Водночас маса прихвата зменшилась приблизно на 1,6 кг.

Тут слід зазначити, що метод топологічної оптимізації лише пропонує потенціальні шляхи оптимізації досліджуваної конструкції. Запропонована конструкція прихвата (виконання С) також є лише одним з можливих варіантів. В результаті додаткових експериментальних досліджень можна досягти більшого зменшення маси прихвата з незначною втратою статичних характеристик конструкції.

### 3.3 Динамічний аналіз системи «верстатний пристрій-заготовка»

Новоутворена поверхня деталі є результатом взаємодії, зокрема, взаємних коливань, поверхні заготовки і леза різального інструмента.

Розрізняють три типи коливань: власні, вимушені та самозбурювальні [15].

Будь-яка конструкція має нескінченну кількість форм та відповідних ним частот власних коливань. Власні частоти коливань також відомі як гармонічні або резонансні частоти, оскільки вони проявляються за умови співпадіння з частотами вимушених коливань, що є причиною виникнення явища резонансу. Власна частота конструкції визначається її масою, геометрією та властивостями матеріалу. Зі збільшенням маси частини її власна частота зменшується, отже, вони обернено пропорційні. Жорсткість деталі є функцією її геометрії, а власна частота зазначеної частини прямо пропорційна жорсткості деталі, тому зміна геометрії деталі призведе до зміни її власної частоти. Нарешті, такі властивості матеріалу, як коефіцієнт Пуассона та модуль Юнга, відіграють важливу роль у резонансі деталі, причому коефіцієнт Пуассона визначає коефіцієнт варіації різних типів мод, а модуль Юнга прямо пропорційний власній частоті.

Вимушені коливання виникають, коли до технологічної системи прикладаються періодичні зовнішні силові збурення. У середовищі оброблення досліджуваною системою є заготовка і верстатний пристрій (часто технологічну систему розглядають як систему «верстат-пристрій-заготовка-інструмент»), причому періодична сила, що прикладається, зазвичай є або дисбалансом обертових елементів у верстаті, або силами різання.



Коливання (вібрації) з власним збудженням виникають, коли вимушені коливання реалізуються з частотою, що дорівнює будь-якій з частот власних коливань системи. Це викликає надмірну вібрацію (збільшення амплітуди коливань), яку ще називають резонансом, оскільки пік кожного вхідного імпульсу збігається з піком системного імпульсу, що посилює висоту хвилі.

Для формулювання рекомендацій, спрямованих на уникнення резонансних явищ під час оброблення заготовки на горизонтально-фрезерній операції було проведено динамічний аналіз досліджуваної системи «верстатний пристрій-заготовка» в модулі Modal Ansys Workbench.

До складу геометричної моделі досліджуваної системи увійшли оптимізовані конструкції стійки та прихвата (виконання С).

В результаті розрахунку моделі були одержані епюри перших трьох форм власних коливань системи (див. рисунки 3.22–3.24) та таблиця власних частот 3.2.

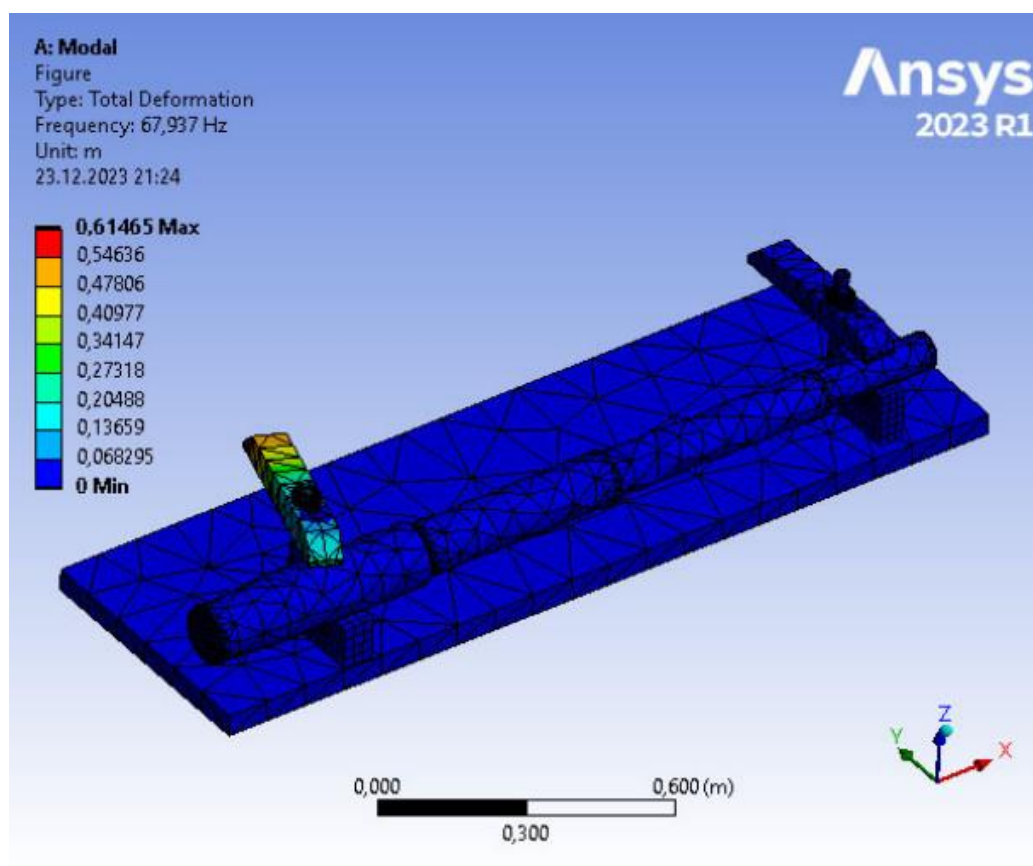


Рисунок 3.22 – Перша форма власних коливань досліджуваної системи

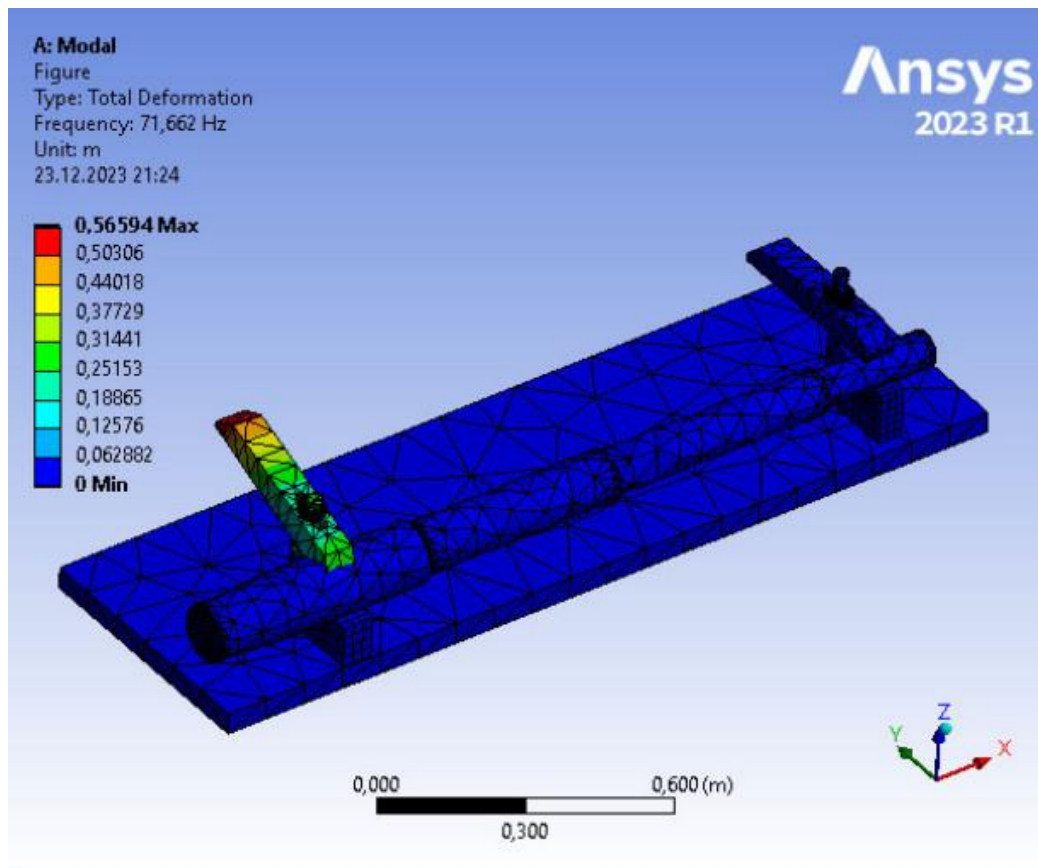


Рисунок 3.23 – Друга форма власних коливань досліджуваної системи

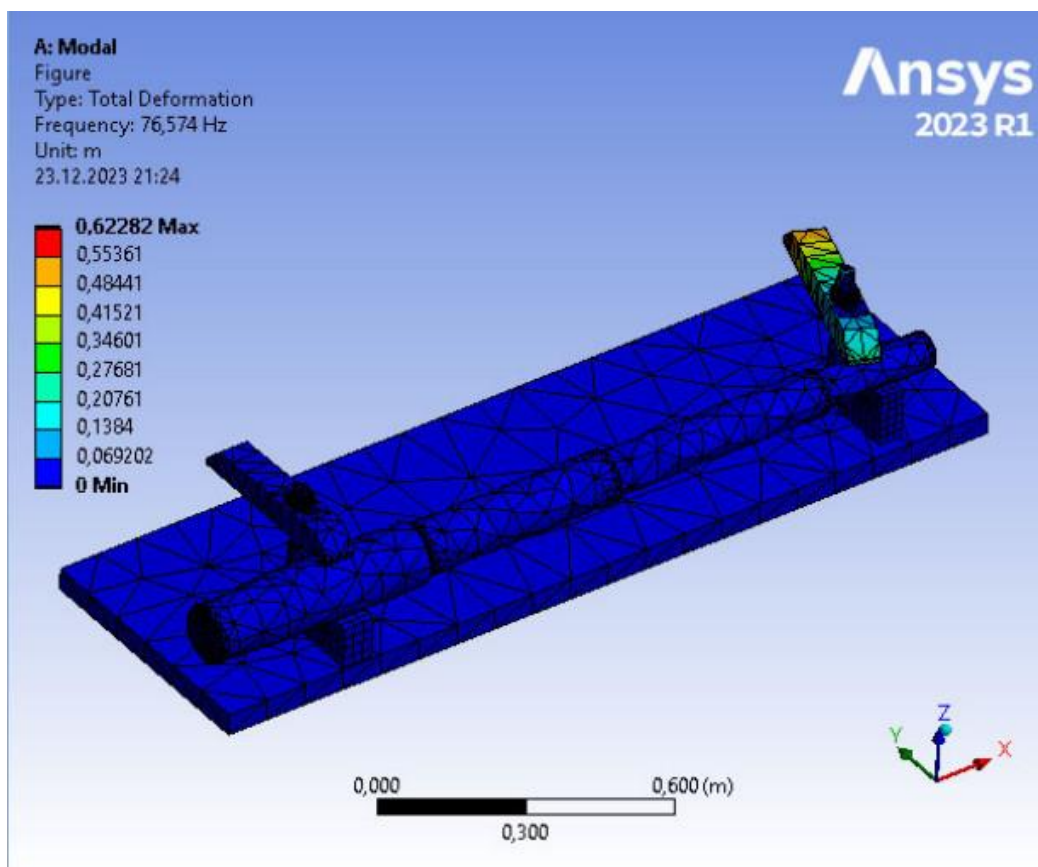


Рисунок 3.24 – Третя форма власних коливань досліджуваної системи

Таблиця 3.2 – Таблиця власних частот досліджуваної системи

Форма власних коливань	Частота, Гц
1	67,937
2	71,662
3	76,574
4	81,303
5	129,180
6	146,010

За результатами аналізу епюр стає зрозумілим, що найменш стійкими елементами досліджуваної системи є прихвати, що мають можливість руху навколо вертикальної осі (стійки) та навколо горизонтальної осі.

Під час оброблення центрального отвору на горизонтально-розточувальній операції зокрема реалізуються свердління ( $n_1 = 400$  об/хв,  $n_2 = 200$  об/хв).

Якщо розглядати свердління як оброблення дволезовим різальним інструментом, то робоча частота становитиме  $\omega_1 = 400 \cdot 2 / 60 = 13,3$  Гц,  $\omega_2 = 200 \cdot 2 / 60 = 6,7$  Гц.

Співставлення визначених робочих частот з частотами власних коливань, наведеними в таблиці 3.2 дозволяє стверджувати, що ймовірність виникнення резонансу за прийнятих режимів різання в досліджуваній системі практично дорівнює нулю, оскільки значення частот значно відрізняються.

Для недопущення виникнення резонансних явищ під час оброблення заготовки в спроектованому верстатному пристрої рекомендується уникати робочих частот, що відповідають наведеним в таблиці 3.2.

### 3.4 Висновок

1. За результатами статичного аналізу спроектованої в розділі 2 конструкції верстатного пристрою для базування та закріплення заготовки на горизонтально-розточувальній операції та реалізації пошукового експериментального дослідження, підібрані такі параметри системи «прихват-

стійка», що задовольняють умовам не перевищення граничних величин загальних переміщень та внутрішніх напружень.

2. Встановлено, що коригування конструкції прихвата, спрямоване на підвищення його жорсткості, водночас викликало значне збільшення його маси. За результатами топологічної оптимізації конструкції прихвата були визначені шляхи зменшення його маси та запропоновано його робочий прототип.

3. За результатами динамічного аналізу системи «верстатний пристрій-заготовка», до складу якої увійшов запропонований прототип конструкції прихвата, встановлено ряд резонансних частот (частот власних коливань) досліджуваної системи, яких необхідно уникати під час оброблення заготовки на горизонтально-розточувальній операції. Порівняння визначених резонансних частот з заданими робочими частотами показало, що виникнення резонансу за прийнятих умов неможливе: спроектована конструкція верстатного пристрою має високі динамічні характеристики та є стійкою в умовах дії динамічних навантажень.

## ВИСНОВКИ

1. В роботі проаналізовано базовий технологічний процес виготовлення штока РТ 117.234.02-03. Основними недоліками існуючої технології є низький рівень автоматизації та механізації процесу, спричинений використанням застарілих металорізальних верстатів та засобів технологічного оснащення.

2. Запропонований перспективний технологічний процес з урахуванням нововведень, спрямованих на підвищення продуктивності виробництва, стабілізацію точності та якості оброблених поверхонь деталі, покращання умов праці робочих, зокрема через впровадження верстатів з ЧПК та механізованих верстатних пристроїв.

3. Для базування та закріплення заготовки на горизонтально-розточувальній операції спроектовано верстатний пристрій з пневматичним приводом закріплення заготовки.

4. Правильність прийнятих під час проектування верстатного пристрою проектно-конструкторських рішень були перевірені шляхом дослідження системи «верстатний пристрій-заготовка» методами статичного та динамічного аналізу. Для забезпечення стійкої роботи верстатного пристрою в умовах статичних та динамічних навантажень скориговано конструкцію системи «прихват-стійка», що водночас призвело до значного збільшення маси прихвата. За результатами топологічної оптимізації конструкції прихвата були визначені шляхи зменшення його маси та запропоновано його робочий прототип.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Клименко О. Д. Хімічна технологія та обладнання підприємств. Навчальний посібник для студентів спеціальності 133 – «Галузеве машинобудування» денної та заочної форм навчання / О. Д. Клименко, Е. Л. Селезньов. Луцьк: Луцький НТУ, 2018. 136 с.
2. ДСТУ 7806:2015. Прокат з легованої конструкційної сталі. Технічні умови.
3. Бойко Ю. І. Технологія машинобудування. Курсове проектування : навч. посіб. / Ю. І. Бойко, О. А. Литвиненко. Київ: НУХТ, 2018. 195 с.
4. Біланенко В. Г. Проектування технологічних процесів. Частина 1. Оброблення деталей-тіл обертання. [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка», спеціалізацій «Технології машинобудування» та «Технології виготовлення літальних апаратів» / Біланенко В. Г., Приходько В. П., Мельник О. О.; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 232 с.
5. 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.
6. 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.
7. Pellegrinelli, S., Senati, C., Cevasco, L., Giannini, F., Lupinetti, K., Monti, M., Parazzoli, D. Design and Inspection of Multi-fixturing Pallets for Mixed Part Types. Procedia CIRP, Volume 36, 2015, 159–164, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.007>.

8. Calabrese, M., Primo, T. Del Prete, A. Optimization of Machining Fixture for Aeronautical Thin-walled Components. *Procedia CIRP*, Volume 60, 2017, 32–37, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.02.008>.
9. Tyflopoulos, T., Steinert, M. Messing with boundaries - quantifying the potential loss by pre-set parameters in topology optimization. *Procedia CIRP*, Volume 84, 2019, 979–985, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.307>.
10. Pilagatti, A. N., Vecchi, G., Atzeni, E., Iuliano, L., Salmi, A. Generative Design and new designers' role in the manufacturing industry. *Procedia CIRP*, Volume 112, 2022, 364-369, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.09.010>.
11. Gameros, A. A., Axinte, D., Siller, H. R., Lowth, S., Winton, P. (2017). Experimental and Numerical Study of a Fixturing System for Complex Geometry and Low Stiffness Components. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 139. 10.1115/1.4034623.
12. Möhring, H.-Ch., Wiederkehr, P. Intelligent Fixtures for High Performance Machining. *Procedia CIRP*, Volume 46, 2016, 383–390, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.042>.
13. Sallese, L., Grossi, N., Tsahalis, J., Scippa, A., Campatelli, G. Intelligent Fixtures for Active Chatter Control in Milling. *Procedia CIRP*, Volume 55, 2016, 176–181, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.08.019>.
14. Moussavi, S., Guskov, M., Duchemin, J., Lorong, F. Clamping Modeling in Automotive Flexible Workpieces Machining. *Procedia CIRP*, Volume 101, 2021, 134–137, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.04.004>.
15. Slabbert, E., Walker, A., Bright, G. (2018). An automated flexible fixture system for mass customisation. *South African Journal of Industrial Engineering*. 29. 10.7166/29-1-1802.
16. Що таке генеративний дизайн і де його використовують? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.imena.ua/blog/what-is-generative-design-and-where-is-it-used/>. – Заголовок з екрану.

17. Ansys. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:  
<https://uk.wikipedia.org/wiki/Ansys>. – Заголовок з екрану.