

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Сумський державний університет

Центр заочної, дистанційної та вечірньої форм навчання

(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 диска 4.2303.100 СК**

шляхом структурно-параметричної оптимізації верстатного пристрою для

базування та закріплення заготовки на горизонтально-розточувальній операції

Здобувача (ки) групи **ТМ.мз-22с**

(шифр групи)

Кравченко Дмитро Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

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

Дмитро КРАВЧЕНКО

(підпис)

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Керівник

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

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

(підпис)

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 ІСНУЮЧОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ.....	7
1.1 Аналіз службового призначення машини, вузла, деталі.....	7
1.2 Аналіз технічних вимог, що пред'являють до конструкції деталі.....	12
1.3 Визначення типу виробництва та форми організації робіт	14
1.4 Аналіз технологічності конструкції деталі	16
1.5 Аналізу маршруту існуючого технологічного процесу виготовлення деталі	18
1.6 Висновок	23
РОЗДІЛ 2 ПРОЄКТУВАННЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ.....	24
2.1 Розроблення маршруту перспективного технологічного процесу виготовлення деталі	24
2.2 Обґрунтування вибору способу одержання первинної заготовки, визначення розмірів та формулювання технічних вимог на виготовлення заготовки	28
2.3 Аналіз комплексної на обробному центрі з ЧПК операції	31
2.3.1 Аналіз схеми базування та закріплення заготовки.....	31
2.3.2 Обґрунтування вибору металорізального обладнання	34
2.3.3 Обґрунтування вибору засобів технологічного оснащення	35
2.3.4 Визначення режимів різання та технічних норм часу.....	36
2.4 Проєктування верстатного пристрою	37
2.5 Висновок	42
РОЗДІЛ 3 СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ ВЕРСТАТНОГО ПРИСТРОЮ.....	43
3.1 Актуальність, мета та методи дослідження.....	43

3.2 Аналіз напружено-деформованого стану конструкції верстатного пристрою	46
3.3 Топологічна оптимізація конструкції верстатного пристрою	56
3.4 Модальний аналіз конструкції верстатного пристрою	66
3.5 Висновок	70
ВИСНОВКИ.....	71
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	72

ВСТУП

Диск 4.2303.100 СК входить до складу вентилятора осьового ВО-№5, одноступінчастого із спрямовуючим апаратом, призначеного для систем вентиляції та систем маслоохолодження в газоперекачувальних агрегатах. В умовах глобальної енергетичної кризи удосконалення технологічних процесів виготовлення газоперекачувальних агрегатів та їх компонентів є актуальним завданням.

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.

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

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

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності технологічного процесу виготовлення «диска» 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 існуючого технологічного процесу виготовлення «диска»;
- 2) розробити перспективний (раціональний) технологічний процес виготовлення «диска»;
- 3) спроектувати верстатний пристрій для базування та закріплення заготовки «диска» на горизонтально-розточувальній операції;
- 4) дослідити спроектовану конструкцію верстатного пристрою методами статичного, динамічного аналізу та методом топологічної оптимізації.

Сформулювати рекомендації щодо вдосконалення конструкції верстатного пристрою, спрямовані на його ефективну роботу в умовах статичних та динамічних навантажень.

Методи дослідження. Твердотільну модель 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.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що на основі теоретичних та експериментальних досліджень оптимізовано конструкцію окремих елементів верстатного пристрою для установки заготовки «диска» на горизонтально-розточувальній операції та сформульовано рекомендації щодо вдосконалення його конструкції для забезпечення її ефективної роботи в умовах дії статичних та динамічних навантажень.

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 «диска», запропоновані технологічні рішення, спрямовані на вдосконалення існуючого технологічного процесу механічного оброблення заготовки. Спроектовано конструкцію верстатного пристрою. Виконано

дослідження конструкції верстатного пристрою методами статичного та динамічного аналізу.

Структура та обсяг роботи. Робота складається зі вступу, 3-х розділів, загальних висновків, переліку використаних посилань з 28 найменувань, 74 сторінок основного тексту, 38 рисунків та 8 таблиць.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ ІСНУЮЧОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ
ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ

1.1 Аналіз службового призначення машини, вузла, деталі

Диск 4.2303.100 СК, що є об'єктом роботи, входить до складу вентилятора осьового ВО-№5, одноступінчастого із спрямовуючим апаратом, призначеного для систем вентиляції та маслоохолодження в ГПА.

Основні технічні характеристики установки вентиляції наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Технічна характеристика установки

Найменування характеристики	Величина
Продуктивність, м ³ /с	333
Максимальний ККД	0,61
Повний тиск, Па	1300
Частота обертання робочого колеса, об/хв	300
Потужність електродвигуна, кВт	11

Умови експлуатації установки:

- температура навколишнього середовища – від -45 °С до +45 °С;
- температура переміщуваного повітря – не вище ніж +45 °С;
- відносна вологість – не вище ніж 80 %;
- атмосферний тиск – від 86,6 кПа до 106 кПа (650 – 800 мм рт. ст.).

До складу вентилятора входить корпус, на якому кріпиться електродвигун. На валу електродвигуна встановлено колесо (див. рисунок 1.1). До складу колеса входять диск 4.2303.100 СК, що в свою чергу складається з диска 2 і втулки 1, лопатки 3, яка встановлюється на зовнішній поверхні диска 1 за отвором $\varnothing 42/\varnothing 16H8/f8$ і фіксується від повертання штифтом 4 (штифт встановлюють в лопатку 3 за пресовою посадкою $\varnothing 6H7/m6$).

Закріплення лопатки 3 на диску 1 виконують за допомогою гайки 5 з фіксацією стопорною шайбою 6. Лопатки в кількості 8 штук, встановлені на диск, під час обертання створюють вихровий потік повітря, достатній для вентиляції системи маслоохолодження.

Диск 4.2303.100.02 (див. додаток А) входить до складальної одиниці 4.2303.100 СК та загалом є тілом обертання типу «диск». Відповідно до базової технології виготовлення деталі як матеріал використовують алюмінієвий сплав АК-12. Як замітники використовують сплави АК5М2, АК5М7, АМ5 згідно з ГОСТ 1583-93.

Ескіз деталі із зазначенням розмірів та інших технічних вимог наведено на рисунку 1.2. Ескіз деталі з нумерацією поверхонь наведено на рисунку 1.3.

Класифікація поверхонь деталі (див. рисунок 1.3):

- за призначенням:

Виконавчі поверхні: бокова поверхня шпонкового паза 23 – призначена для передачі крутного моменту диску від вала ЕД.

Основні конструкторські бази (ОКБ): 22, 23, 24. Поверхні отвору 22, торця 20 (24), бокова поверхня шпонкового паза 23 використовують для визначення положення деталі (складальної одиниці) у виробі. Поверхня 22 отвору $\varnothing 38H7/g6$ визначає положення деталі (складальної одиниці) на валу за посадкою з зазором.

За торцем 20 (24) диск упирається в торець шийки вала електродвигуна, що перешкоджає його осьовому переміщенню уздовж центральної осі. За допомогою бокової поверхні шпонкового паза 23 здійснюється фіксація диска від повертання навколо центральної осі за шпонкою.

Допоміжні конструкторські бази (ДКБ): 3, 6, 7, 13, 15, 21.

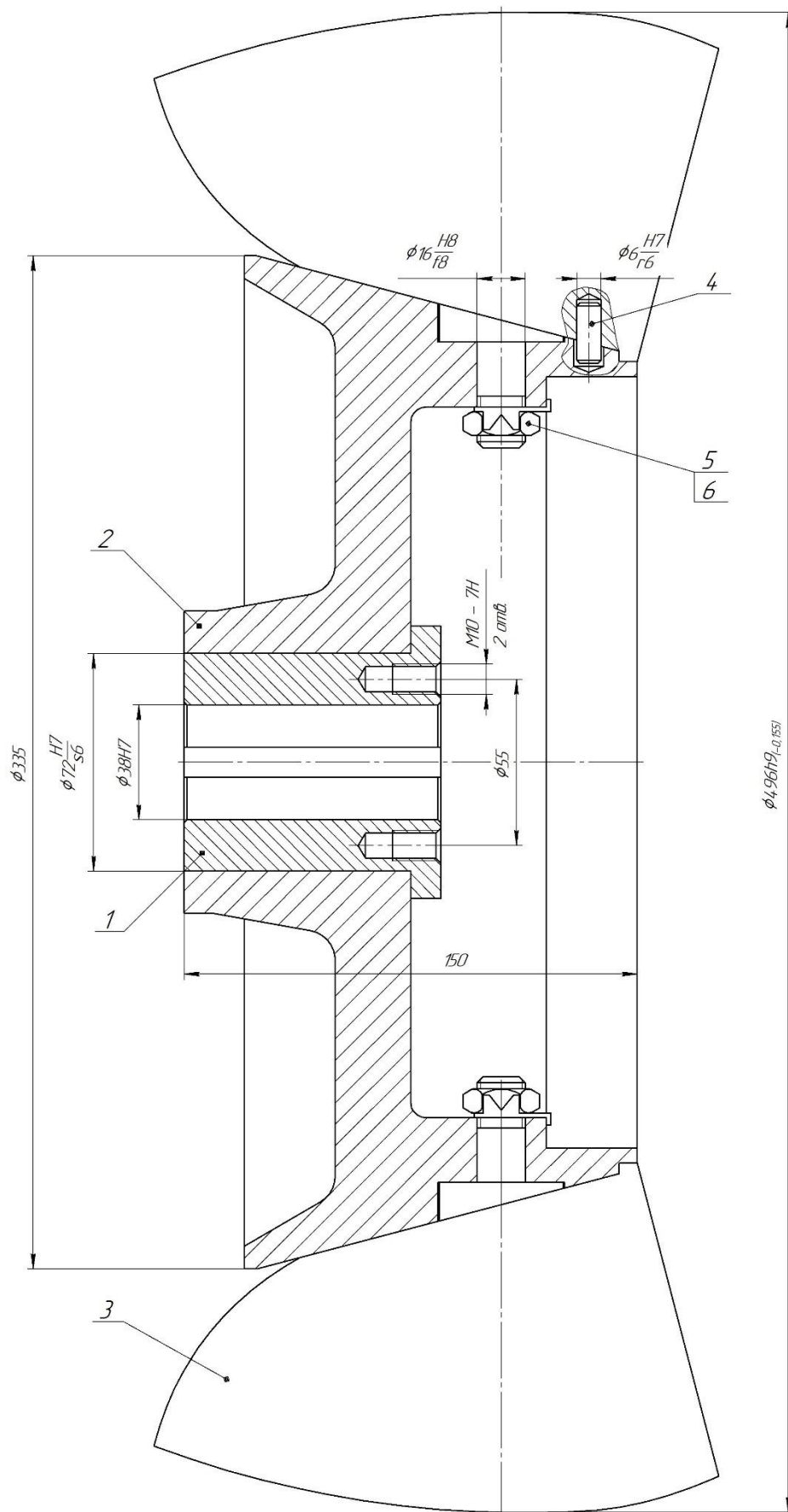


Рисунок 1.1 – Ескіз колеса

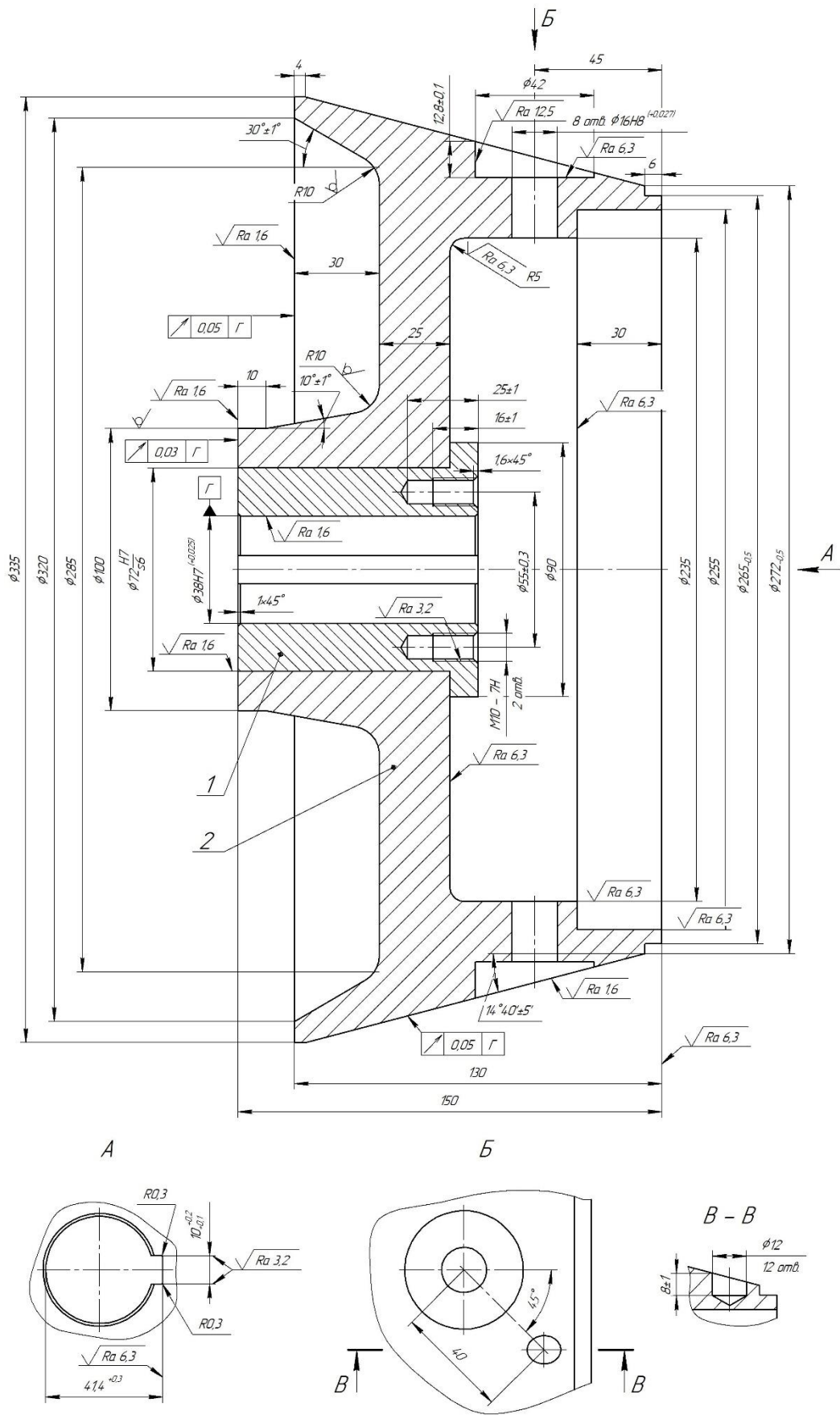


Рисунок 1.2 – Ескіз диска

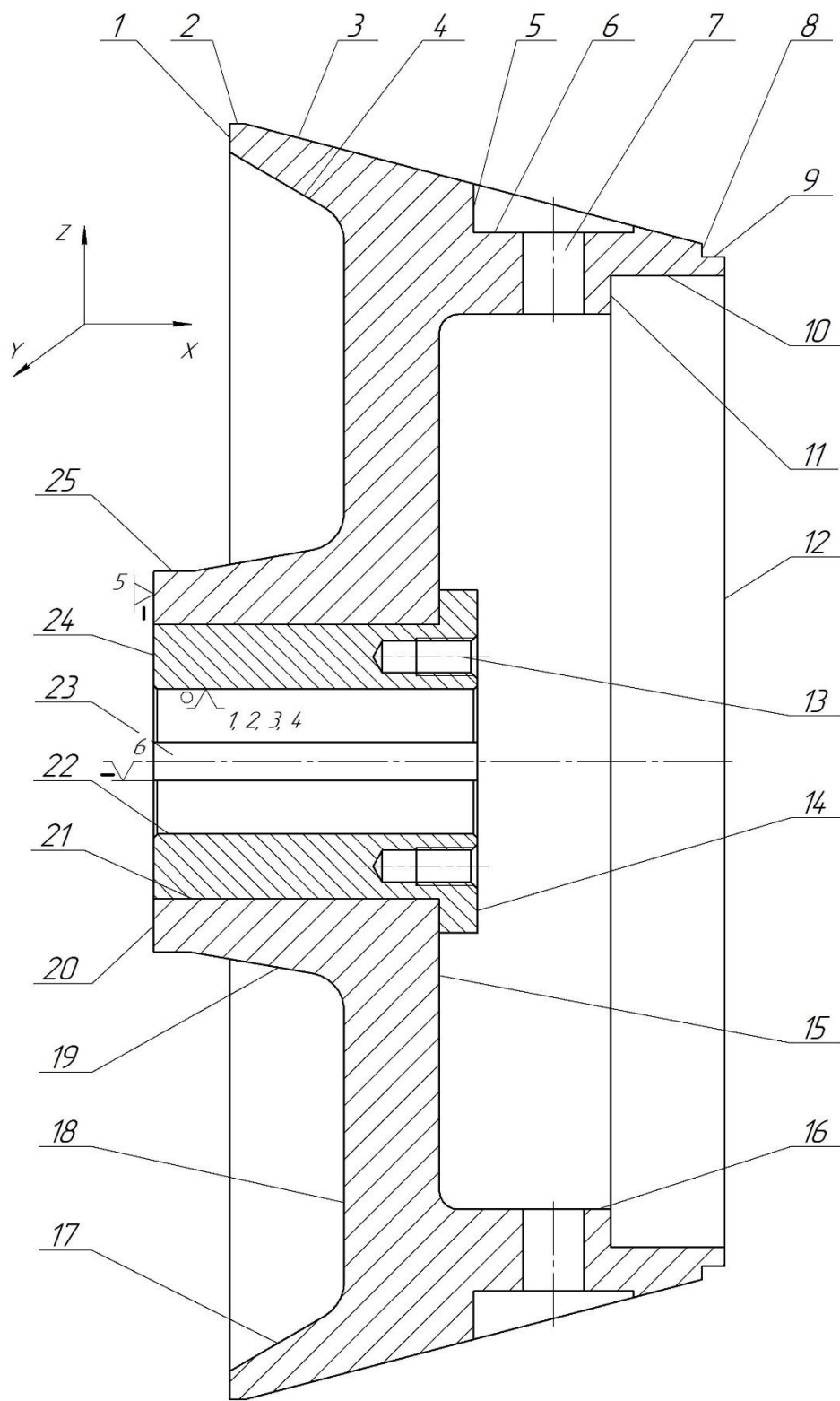


Рисунок 1.3 – Нумерація поверхонь деталі

Зовнішня конічна поверхня диска 3, торцева поверхня 6 і поверхня отвору 7 призначені для установлення лопаток. Під час установлення лопаток за отвором 7 реалізується посадка з зазором $\varnothing 16H8/f8$. Крім того, для запобігання

провертання лопатки навколо вертикальної осі в диску передбачено отвір $\varnothing 12$ мм, до якого входить штифт, запресований за посадкою $\varnothing 6H7/m6$ у лопатку (на рисунку 1.3 не вказано).

Циліндричний отвір 15 і торцева поверхня 21 визначають положення втулки, яку запресовують в диск за посадкою $\varnothing 72H7/s6$.

Різьбові отвори 13 призначені для закріплення кронштейна, який використовують під час складання вузла.

Інші поверхні деталі призначені для визначення об'єму та загальної форми виробу тобто є «вільними».

Характеристика базування диска на валу електродвигуна відповідно до рисунка 1.3 представлено таблицею відповідності 1.2 та матрицею зв'язків 1.3.

Таблиця 1.2 – Таблиця відповідності

Таблиця 1.3 – Матриця зв'язків

Зв'язки	Ступінь свободи	Найменування бази		X	Y	Z	Найменування бази
1, 2, 3, 4	II, III, V, VI	Подвійна направляюча	L	0	1	1	Подвійна направляюча
			α	0	1	1	
5	I	Опорна	L	1	0	0	Опорна
			α	0	0	0	
6	IV	Опорна	L	0	0	0	Опорна
			α	1	0	0	

1.2 Аналіз технічних вимог, що пред'являють до конструкції деталі

Диск являє собою складальну одиницю, до складу якої входить втулка та безпосередньо диск. Диск є тілом обертання з габаритами $\varnothing 335 \times 150$ мм з центральним отвором $\varnothing 72H7$ в якому запресована втулка з центральним отвором $\varnothing 38H7$. Маса диска, як складальної одиниці становить 12 кг.

Диск 4.2303.100 СК виконаний у вигляді складальної одиниці, що складається з втулки та безпосередньо диска. Відповідно до функціонального призначення матеріалом диска є алюмінієвий сплав АК-12 ГОСТ 1583-93. Матеріал диска 2 (див. рисунок 1.1) є цілком обґрунтованим, оскільки деталь призначена для надання необхідного взаємного розташування лопаток 3 та

передачі їм обертального руху. Навантаження за такого характеру роботи вузла є мінімальними. Водночас алюміній є досить міцним та легким матеріалом, що забезпечує мінімальну інерційність виробу, необхідну для швидкообертових механізмів.

Сплав АК12 відносять до I групи – сплави на основі Al-Si. Сплави-замінники АК5М2, АК5М7, АМ5 відносять до II групи – метали на основі системи Al-Si-Cu. Сплави зазначених груп піддають термічному обробленню за режимами: T_1 – штучне старіння без попереднього нагрівання під загартування; T_2 – відпалювання.

Кремній є одним із основних легуючих елементів у ливарних алюмінієвих сплавах (силумінах). Силуміни зазвичай містять від 5 до 14% Si. Сплав АЛ2 (АК12) є типовим силуміном із вмістом 10–13 % Si. Механічні властивості такого сплаву дуже низькі: $\sigma_B = 120\text{--}160$ МПа за відносного подовження $\delta < 1$ %.

Водночас такі сплави характеризуються дуже важливими властивостями, які насилу вдається досягти в інших міцніших сплавах: високою рідкоплинністю, зварюваністю. Вони мають малу усадку під час лиття, у зв'язку з чим стає низькою їх схильність до утворення усадкових тріщин. Силуміни, внаслідок малої різниці за розчинністю кремнію за високої та низької температур, практично не зміцнюються термічним обробленням, тому найважливішим методом покращення його механічних властивостей є модифікування. Механічні властивості після модифікації АЛ2 (АК12) становлять: $\sigma_B = 170\text{--}220$ МПа, за $\delta = 3\text{--}12$ %.

Володіючи високими ливарними властивостями, силуміни є основним первинним матеріалом для створення технологічних і водночас високоміцних ливарних алюмінієвих сплавів, які можуть зазнавати зміцнювальної термічної обробки. Міцність сплавів АК12 (АЛ2) та АК5М (АЛ5) після загартування та старіння виявляється вище ніж 200–230 МПа за подовження $\delta \geq 2\text{--}3$ %.

Конструкція деталі передбачає наявність кількох поверхонь підвищеними вимогами щодо точності та якості.

Зокрема, це поверхні, що виконують функції базових (ОКБ, ДКБ).

Циліндричний отвір $\varnothing 38H7$ (база «Г»), $R_a = 1,6$ мкм – забезпечує гарантований зазор за посадкою $H7/g6$ під час установлення диска на вал. Допуск форми не регламентований, отже, знаходиться в межах 30% допуску на розмір;

Циліндричний отвір $\varnothing 72H7$, $R_a = 1,6$ мкм – дозволяє забезпечити посадку з натягом $H7/s6$ під час пресування втулки в диск;

Циліндричний отвір $\varnothing 16H8$ – забезпечує посадку з гарантованим зазором $H8/f8$ під час установлення лопатки в диск. Шорсткість поверхні кресленням не задана, проте, враховуючи призначення поверхні, може бути задана у розмірі 1,6–3,2 мкм за критерієм R_a . Допуск форми кресленням нерегламентований, отже знаходиться в межах 30% допуску на розмір;

Різьбовий отвір $M10-7H$. Шорсткість 3,2 мкм за критерієм R_a є цілком обґрунтованою.

Зовнішні циліндричні поверхні $\varnothing 265$ мм та $\varnothing 272$ мм мають розмірну точність за 12 квалітетом точності.

Інші поверхні є вільними, їх обробляють за 14 квалітетом точності.

Кресленням деталі задані допуски розміщення: торцеве биття на торець маточини в розмірі 0,03 мм щодо бази «Г», що пояснюється необхідністю забезпечення щільного контакту між поверхнями під час базування диска на валу ЕД; торцеве биття на торець $\varnothing 335$ мм у розмірі 0,05 мм щодо бази «Г» і радіальне биття до зовнішньої конічної поверхні в розмірі 0,05 мм щодо бази «Г» дозволяють забезпечити точне розміщення лопаток, і допустимий дисбаланс обертових частин вузла.

1.3 Визначення типу виробництва та форми організації робіт

Тип виробництва характеризують коефіцієнтом закріплення операцій $K_{з.о.}$, як відношенням всіх різних операцій, виконуваних підрозділом впродовж місяця, до кількості робочих місць [1].

В рамках магістерської роботи розрахунок $K_{3,0}$ виконаємо за методикою [1] з використанням ЕОМ. Первинні дані та результати розрахунку $K_{3,0}$ наведені в додатку Б цієї роботи.

В результаті $K_{3,0} = 27,55$, що відповідає дрібносерійному типу виробництва.

Ключовою характеристикою серійного виробництва є «партія» або «серія». Так, в умовах серійного типу виробництва в обробку запускають партії деталей, що складаються з «однойменних, однотипних за конструкцією та однакових за розмірами виробів одночасно» [1]. Основним принципом такого виробництва є виготовлення всієї партії виробів цілком.

За результатами розрахунку (див. додаток Б) розмір партії за прийнятих умов виробництва становить 29 шт.

Зазвичай, у дрібносерійному виробництві технологічний процес є переважно диференційованим, тобто розчленованим на окремі операції, що закріплені за окремими верстатами. Водночас, за умови насиченості виробництва засобами автоматизації та механізації, раціональним вважається принцип інтеграції. Так, використання обробних центрів з ЧПК дозволяє максимально сконцентрувати обробку заготовки в межах окремого робочого місця, що у свою чергу знижує витрати допоміжного часу та сприяє стабілізації параметрів точності оброблюваних поверхонь, що зокрема пов'язано зі зменшенням кількості переустановлень заготовки.

В дрібносерійному виробництві в основному використовують універсальні верстати, верстати з ЧПК та обробні центри з ЧПК. Під час використання універсальних верстатів широко застосовують спеціальні та спеціалізовані пристрої, спеціалізований та спеціальний різальний інструмент, вимірювальний інструмент у вигляді граничних (стандартних та спеціальних) калібрів та шаблонів, що забезпечують взаємозамінність оброблених деталей.

Для дрібносерійного виробництва характерною є групова форма організації робіт, що передбачає формування предметно-замкнутої ділянки. Основним принципом формування такої ділянки є підбір верстатів та оснастки

для виготовлення групи деталей, подібних за своїми конструктивно-технологічними ознаками.

1.4 Аналіз технологічності конструкції деталі

Технологічною вважається така конструкція деталі, оброблення якої можливе з максимальною продуктивністю та мінімальною собівартістю [1].

Габарити $\varnothing 352 \times 150$ та масу 12 кг деталі можна вважати технологічною ознакою, оскільки її можна встановлювати на верстаті середніх розмірів вручну, тобто без застосування додаткових підйомно-транспортних механізованих засобів.

Конфігурація деталі утворюється сукупністю поверхонь правильної форми (плоскі торці, циліндричні отвори, конічна поверхня). Водночас наявність конічної поверхні можна вважати нетехнологічною ознакою, оскільки базування деталі під час її виготовлення та контролю за такою поверхнею практично неможливе.

Матеріалом деталі є алюмінієвий сплав – АК12. Сплави на основі алюмінію є досить дорогими, використовуються в авіабудуванні та інших наукомістких виробництвах, що визначає їх затребуваність. З одного боку використання алюмінієвого сплаву робить деталь (заготовку) легкою, що є технологічною ознакою. Водночас використання алюмінію підвищує собівартість виробництва деталі, що є нетехнологічною ознакою. Ще одним неочевидним недоліком може бути низька твердість алюмінієвого сплава, що може спричинити додаткові похибки під час закріплення заготовки у зв'язку з можливою деформацією базових поверхонь за великих сил закріплення та малої площі контакту з опорними елементами верстатного пристрою.

З точки зору зручності базування конструкція деталі не є технологічною, оскільки відсутні досить розвинені за габаритами поверхні, придатні для використання в ролі технологічних баз. Як було сказано вище, конічну поверхню, не зважаючи на її габарити, не можна використовувати як базу. Під час установа заготовки в токарному патроні необхідно використовувати

розточування кулачків. На свердлильних та розточувальних операціях необхідно розробляти спеціальні конструкції установчих елементів верстатних пристроїв [1, 2].

На кресленні деталі всі розміри проставлені зручно та дозволяють вести контроль стандартними вимірювальними інструментами відповідно до чинних стандартів.

Допуски форми і розташування поверхонь цілком досяжні на обладнанні, що застосовується в умовах діючого виробництва, за цією ознакою деталь є технологічною.

До нетехнологічних конструктивних елементів деталі слід віднести:

- центральний отвір $\varnothing 38H7$. Забезпечення такої точності вимагає багатоетапного оброблення заготовки (3–4 етапи), що підвищує собівартість виготовлення деталі [2];

- центральний отвір $\varnothing 72H7$. Забезпечення такої точності вимагає багатоетапного оброблення заготовки (3–4 етапи), що підвищує собівартість виготовлення деталі [2];

- шпонковий паз $B = 10$ мм. Для одержання такого отвору необхідний спеціальний довбальний різець або високовартісна протяжка. Щодо довбання протягування є продуктивнішим процесом, але й вимагає коштовного інструменту;

- протяжні конічні поверхні (кути $20^{\circ}40' \pm 5'$, $10^{\circ} \pm 1^{\circ}$, радіальне биття – трохи більше 0,05 мм);

- східчасті отвори $\varnothing 42/\varnothing 16H8$. Вісь отворів розташована перпендикулярно до центральної осі деталі на конічній поверхні;

- глухі різьбові отвори M10-7H. Стружковидалення утруднене.

Водночас висока точність циліндричних поверхонь $\varnothing 72H7$ та $\varnothing 38H7$, що виконують функції ОКБ, дає змогу під час складання виробу застосувати метод повної взаємозамінності (без низькопродуктивних припасовувань та регулювання).

Отже, за якісними ознаками технологічність конструкції деталі можна оцінити на «добре».

1.5 Аналізу маршруту існуючого технологічного процесу виготовлення деталі

Інформація про маршрутно-операційну технологію щодо виготовлення диска 4.2303.100 СК зібрано в рамках переддипломної практики. Короткий опис технологічного процесу наведено в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Короткий опис маршруту існуючого технологічного процесу виготовлення деталі

Номер операції	Найменування та короткий зміст операції	Устаткування	Базування заготовки
005	Лиття металів і сплавів	Машина для лиття	–
010	Термічна	Термічна піч	–
015	Токарно-гвинторізна. Установ А: чорнове підрізання зовнішніх торців, обточування зовнішньої циліндричної поверхні, обточування конусу, розточування центрального отвору. Установ Б: чорнове підрізання зовнішнього торця, розточування східчастого отвору з підрізанням торців.	Токарно-гвинторізний верстат моделі 16К30	Установ А: за внутрішньою циліндричною поверхнею з упором в торець. Установ Б: за зовнішньою циліндричною поверхнею з упором в торець. В самоцентрувальному трьох-кулачковому токарному патроні
020	Технічний контроль. Проміжний контроль розмірів та якості оброблених поверхонь	Стіл ВТК	–

Продовження таблиці 1.4

Номер операції	Найменування та короткий зміст операції	Устаткування	Базування заготовки
025	Токарно-гвинторізна. Установ А: півчистове та чистове підрізання зовнішнього торця, розточування східчастого отвору з підрізанням торців галтелей та фасок, обточування конусу, обточування зовнішньої циліндричної поверхні. Установ Б: півчистове та чистове підрізання зовнішніх торців, півчистове, чистове та тонке розточування центрального отвору	Токарно-гвинторізний верстат моделі 16К30	Установ А: за внутрішньою циліндричною поверхнею з упором в торець. Установ Б: за внутрішньою циліндричною поверхнею з упором в торець. В самоцентрувальному трьох-кулачковому токарному патроні
030	Технічний контроль. Остаточний контроль розмірів та якості оброблених поверхонь	Стіл ВТК	–
035	Слюсарно-складальна. Запресовування втулки в центральний отвір диска за посадкою Н7/с6	Слюсарний верстак. Прес гідравлічний	–
040	Технічний контроль. Візуальний контроль виробу	Стіл ВТК	–
045	Розмічувальна. Розмічування під довбання шпонкового паза	Стіл для розмічування	–
050	Довбальна. Однократне довбання шпонкового паза	Верстат вертикально-довбальний моделі 7Д430	За зовнішнім торцем та центральним отвором з вивірянням. Комплект УСП
055	Технічний контроль. Контроль ширини паза та якості бокових поверхонь паза	Стіл ВТК	–

Продовження таблиці 1.4

Номер операції	Найменування та короткий зміст операції	Устаткування	Базування заготовки
060	Внутрішньо-шліфувальна. Чистове шліфування центрального отвору	Внутрішньо-шліфувальний верстат моделі 3A227	За внутрішньою циліндричною поверхнею з упором в торець. В самоцентрувальному трьох-кулачковому токарному патроні
065	Технічний контроль. Контроль точності та якості центрального отвору	Стіл ВТК	–
070	Горизонтально-розточувальна. Свердління, розточування 8 східчастих отворів, зенкерування 8 отворів Ø16H8	Горизонтально-розточувальний верстат 2622В	За внутрішньою циліндричною поверхнею з упором в торець. В спеціальному верстатному пристрої
075	Технічний контроль. Контроль точності та якості поверхонь східчастих отворів	Стіл ВТК	–
080	Розмічувальна. Розмічування 8 отворів під оброблення отворів Ø12H14	Стіл для розмічування	–
085	Радіально-свердлильна. Свердління 8 отворів Ø12H14	Радіально-свердлильний верстат моделі 2M55	За внутрішньою циліндричною поверхнею з упором в торець. В спеціальному верстатному пристрої
090	Слюсарна	Слюсарний верстак	–
095	Технічний контроль. Контроль точності та якості основних поверхонь деталі	Стіл ВТК	–
100	Маркувальна. Маркування шифру робочого креслення виробу	Слюсарний верстак	–

Аналіз існуючого технологічного процесу виготовлення диска 4.2303.100 СК показав, що загалом маршрут складений грамотно, із дотриманням принципів диференціації операцій, поетапності оброблення поверхонь, постійності та співпадіння баз [2]. Водночас слід відмітити низький рівень використання автоматизації та механізації технологічного процесу. Під час виготовлення деталі практично не використовуються верстати з ЧПК. У верстатних пристроях реалізовано ручні приводи закріплення заготовок. Все це визначає низьку продуктивність виробництва та незадовільні умови праці робітників. Точність верстатів дозволяє забезпечити вимоги робочого креслення деталі, але відсутність автоматизованих систем визначає низьку стабільність забезпечуваної точності та якості оброблених поверхонь. Використовувані верстати за габаритами робочого простору часто перевищують необхідні параметри в декілька разів, що говорить про їх нераціональний підбір.

В технологічному процесі використовуються стандартні різальні інструменти (різці, свердла, зенкери, мітчики) з ріжучою частиною із твердих сплавів марок ВК6, ВК4, швидкорізальної сталі марки Р6М5 та інших.

Для вимірювання та контролю точності поверхонь використовуються стандартні шкальні контрольно-вимірювальні інструменти: лінійки, штангенциркулі, глибиноміри, нутроміри тощо. Для контролю радіальних та торцевих биттів використовуються індикаторні головки з ціною поділки 0,01 мм. Для контролю якості поверхонь на робочих місцях використовуються зразки шорсткості згідно з ГОСТ 9378-93 та портативні профілометри.

Кваліфікація робочих обумовлена використанням неавтоматизованого металорізального обладнання. На верстатах працюють токарі, фрезерувальники, свердлувальники 4–6 розрядів. На операціях розмічування та слюсарно-складальних операціях працюють робітники 5 розряду. Відсутність операцій з ЧПК зумовлює і використання низькопродуктивних операцій розмічування.

Операція 005 лиття металів та сплавів передбачає одержання виливка литтям у кокіль. Лиття у кокіль дає високу точність та якість поверхонь,

забезпечує високу продуктивність та низьку собівартість виробництва виливків за рахунок використання багаторазових форм [3].

Операції 015 та 025 токарно-гвинторізнi. Оброблення протяжної конічної поверхні потребує додаткових налаштувань технологічної системи, що знижує продуктивність виробництва. Цю проблему можна легко вирішити впровадженням в технологічний процес верстатів з ЧПК. Суттєвим недоліком є те, що для реалізації установів А і Б для кожної заготовки багато часу необхідно витратити на переустановлення кулачків токарного патрону під різні діаметри заготовки. Вирішенням цієї проблеми може стати підвищення рівня диференціації токарних операцій: кожний установ буде реалізовано на окремій операції з кулачками, заздалегідь встановленими на потрібний діаметр заготовки.

Операція 050 довбальна. Для установлення заготовки використовується комплект УСП. Для забезпечення точності оброблюваних поверхонь використовують попереднє розмічування та вивіряння. Використання верстатного пристрою зі спеціальними установлювальними елементами, адаптованими під заготовку диска, дозволить усунути операцію розмічування та вивіряння, що сприятиме підвищенню продуктивності операції.

Операція 060 внутрішньо-шліфувальна. Основною перевагою операції абразивного шліфування є можливість стабільного забезпечення точності та якості поверхонь на рівні 7 квалітету точності та шорсткості поверхні 1,6 мкм за критерієм Ra. Водночас, процес абразивного шліфування значно поступається методам лезового оброблення (точіння, розточування) за продуктивністю. Також слід пам'ятати, що абразивне шліфування часто є причиною виникнення дефектів поверхневого шару оброблюваного матеріалу у вигляді прижогів. Отже, під час формування раціонального технологічного процесу виготовлення диска слід розглянути можливість заміни абразивного шліфування тонким точінням у рамках токарної операції з ЧПК.

Операції 070 горизонтально-розточувальна та 085 радіально-свердлильна. Для стабілізації точності та підвищення продуктивності виробництва слід

розглянути можливість об'єднання операцій в одну, комплексну на обробному центрі з ЧПК. Це зокрема дозволить скоротити час на переустановлення заготовки та усунути розмічувальну операцію.

Повсюдне впровадження верстатів з ЧПК та обробних центрів з ЧПК, верстатних пристроїв з механізованими приводами закріплення заготовок, дозволить стабілізувати забезпечення точності та якості оброблених поверхонь, покращити умови праці робочих, знизити розряд робіт. Як результат, на додаток, це також дозволить скоротити кількість операцій технічного контролю або запровадити контроль на робочих місцях.

1.6 Висновок

За результатами аналізу існуючого технологічного процесу виготовлення деталі встановлено, що основним недоліком базової технології є відсутність або вкрай низький рівень застосування засобів автоматизації та механізації, що у свою чергу визначає низьку стабільність в забезпеченні точності та якості оброблюваних поверхонь заготовок та низьку продуктивність виробництва. Більшість недоліків існуючої технології можуть бути вирішені впровадженням у технологічний процес операцій з ЧПК. Ефективність використання верстатів з ЧПК можна суттєво підвищити через використання верстатних пристроїв з механізованими приводами закріплення заготовок та спеціальними встановлюваними елементами, адаптованими під конфігурацію заготовки.

Раціональність використовуваного способу одержання первинної заготовки слід уточнити шляхом проведення техніко-економічного обґрунтування альтернативних варіантів.

РОЗДІЛ 2

ПРОЄКТУВАННЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ

2.1 Розроблення маршруту перспективного технологічного процесу виготовлення деталі

З урахуванням зауважень та пропозицій, сформульованих в розділі 1 цієї роботи було складено короткий опис маршруту перспективного технологічного процесу виготовлення диска 4.2303.100 СК, наведений в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Короткий опис маршруту перспективного технологічного процесу виготовлення деталі

Номер операції	Найменування та короткий зміст операції	Устаткування	Базування заготовки
005	Лиття металів і сплавів	Машина для лиття	–
010	Термічна	Термічна піч	–
015	Токарна з ЧПК. Чорнове, півчистове і чистове підрізання зовнішніх торців, обточування зовнішньої циліндричної поверхні, обточування конусу, чорнове, півчистове, чистове та тонке розточування центрального отвору $\varnothing 72H7$.	Токарний верстат з ЧПК моделі ST-30 (HAAS)	За внутрішньою циліндричною поверхнею з упором в торець. В самоцентрувальному трьох-кулачковому токарному патроні
020	Технічний контроль. Проміжний контроль розмірів та якості оброблених поверхонь	На робочому місці	–
025	Токарна з ЧПК. Чорнове, півчистове та чистове підрізання зовнішнього торця, розточування східчастого отвору з підрізанням торців.	Токарний верстат з ЧПК моделі ST-30 (HAAS)	За зовнішньою циліндричною поверхнею з упором в торець. В самоцентрувальному трьох-кулачковому токарному патроні

Продовження таблиці 2.1

Номер операції	Найменування та короткий зміст операції	Устаткування	Базування заготовки
030	Технічний контроль. Проміжний контроль розмірів та якості оброблених поверхонь	На робочому місці	–
035	Слюсарно-складальна. Запресовування втулки в центральний отвір диска за посадкою H7/s6	Слюсарний верстак. Прес гідравлічний	–
040	Технічний контроль. Візуальний контроль виробу	На робочому місці	–
045	Довбальна з ЧПК. Однократне довбання шпонкового паза	Верстат вертикальний довбальний з ЧПК моделі BK5030 CNC	За зовнішнім торцем та центральним отвором. У спеціальному верстатному пристрої
050	Технічний контроль. Контроль ширини паза та якості бокових поверхонь паза	На робочому місці	–
055	Токарна з ЧПК. Тонке розточування центрального отвору $\varnothing 38H7$	Токарний верстат з ЧПК моделі ST-30 (HAAS)	За внутрішньою циліндричною поверхнею з упором в торець. В самоцентрувальному трьох-кулачковому токарному патроні
060	Технічний контроль. Контроль точності та якості центрального отвору	На робочому місці	–
065	Комплексна на обробному центрі з ЧПК. Свердління, розточування 8 східчастих отворів, зенкерування 8 отворів $\varnothing 16H8$, свердління 8 отворів $\varnothing 12H14$	Горизонтальний свердильно-фрезерно-розточувальний верстат з ЧПК типу обробний центр EC-630 (HAAS)	За внутрішньою циліндричною поверхнею з упором в торець. В спеціальному верстатному пристрої
070	Технічний контроль. Контроль точності та якості поверхонь східчастих отворів	На робочому місці	–

Продовження таблиці 1.4

Номер операції	Найменування та короткий зміст операції	Устаткування	Базування заготовки
075	Слюсарна	Слюсарний верстак	–
080	Технічний контроль. Контроль точності та якості основних поверхонь деталі	Стіл ВТК	–
085	Маркувальна. Маркування шифру робочого креслення виробу	Слюсарний верстак	–

Як видно з таблиці 2.1 маршрут перспективного технологічного процесу виготовлення диска зазнав деяких змін порівняно з базовою технологією.

Спосіб одержання заготовки буде уточнено шляхом техніко-економічного обґрунтування в наступному пункті цієї роботи. Згідно з базовою технологією заготовка диска формується литтям у кокіль, що загалом відповідає вимогам серійного виробництва.

Токарно-гвинторізні операції замінені операціями токарними з ЧПК (015, 025) завдяки впровадженню сучасних токарних верстатів з ЧПК моделі ST-30 (HAAS). Оброблення заготовки на токарних операціях з ЧПК відбуватиметься в межах одного установа. Так, на першій з операцій токарний патрон буде налагоджений на один діаметр затискання, а на другій – на інший. Завдяки цьому витрати допоміжного часу мають скоротитися, а продуктивність операції підвищитись. Зменшення кількості переустановок також сприятиме стабілізації точності оброблених поверхонь заготовок.

Операція довбальна була замінена на операцію довбальну з ЧПК завдяки впровадженню сучасного вертикального довбального верстата з ЧПК моделі BK5030 CNC. Такий крок дозволив усунути з технологічного процесу низькопродуктивну операцію розмічування та має привести до стабілізації точності оброблених поверхонь заготовок. Тут слід зауважити, що використання довбального верстата з ЧПК на перший погляд може здатись не раціональним в умовах дрібносерійного виробництва та незначної кількості оброблюваних

поверхонь диска. Водночас слід пам'ятати, що для виготовлення диска планується формування предметно-замкнутої дільниці, розрахованої на випуск групи інших деталей, подібних за своїми конструктивно-технологічними ознаками. Отже, використання високовартісного довбального верстата з ЧПК може бути цілком виправданим.

Операція внутрішньо-шліфувальна була замінена на токарну з ЧПК, що має сприяти підвищенню продуктивності та стабілізації якості оброблених поверхонь заготовок.

Операції горизонтально-розточувальна та радіально-свердлильна були об'єднані в одну комплексну на обробному центрі з ЧПК 065. Для реалізації цієї операції було запропоновано використання горизонтального свердлильно-фрезерно-розточувального верстата з ЧПК типу обробний центр ЕС-630 (НААС). Об'єднання операцій дозволить скоротити кількість переустановок заготовки та як результат підвищити продуктивність операції. Також це сприятиме стабілізації точності оброблених поверхонь заготовок. Використання верстата з ЧПК також дозволить усунути операцію розмічування.

Загалом повсюдне використання верстатів з ЧПК дає змогу покращити умови праці робочих, стабілізувати точність та якість оброблених поверхонь та підвищити продуктивність виробництва. Для підвищення ефективності верстатів з ЧПК планується використовувати верстатні пристрої з механізованим (пневматичним) приводом закріплення заготовки.

Отже, в удосконаленому технологічному процесів виготовлення диска застосовуються принципи інтеграції операцій, принципи поетапності оброблення поверхонь, принципи постійності та співпадіння технологічних баз.

Всі нововведення спрямовані на підвищення продуктивності та зменшення собівартості виробництва.

2.2 Обґрунтування вибору способу одержання первинної заготовки, визначення розмірів та формулювання технічних вимог на виготовлення заготовки

Відповідно до існуючого технологічного процесу заготовку одержують литтям у кокіль. Сутність лиття у кокіль полягає у багаторазовому використанні металевої (сталеві, чавунної, алюмінієвої) форми. Порожнини у виливку виконують металевими або піщаними стрижнями, які витягують із заготовки після її затвердіння та видалення з металевої форми. Перед заливкою кокіль розігрівають до температури 200–300°C. Заготовку виймають гарячою та остаточне її остигання проводиться на повітрі [3].

Продуктивність лиття в кокіль визначають часом його нагрівання та охолодження.

Литтям у кокіль одержують заготовки від кількох грамів до кількох тонн.

Лиття в кокіль має низку технічних і технологічних переваг:

- багаторазове використання форми;
- підвищена точність виливки;
- підвищення щільності виливків та покращення структури металу;
- скорочення або повне вилучення формувальних матеріалів;
- скорочення виробничих площ.

Недоліками є:

- складність одержання тонкостінних виливків;
- невіддатливість та газонепроникність стінок форми, що викликають у виливку короблення та тріщини;
- висока вартість кокілю.

Альтернативним варіантом способу одержання заготовки в умовах дрібносерійного виробництва може бути лиття у піщано-глинисті форми.

Остаточний вибір оптимального методу одержання заготовки можна зробити лише після з економічного обґрунтування за методикою [1].

Собівартість заготовки одержуваної литтям визначають за формулою

$$S_{заг} = \left(\frac{C_i}{1000} \cdot Q \cdot K_m \cdot K_c \cdot K_g \cdot K_M \cdot K_n \right) - (Q - q) \frac{S_{вдх}}{1000},$$

де C_i – базова вартість 1 т заготовок, грн;

Q й q – маса заготовки й готової деталі;

K_m, K_c, K_g, K_M, K_n – коефіцієнти, що залежать від класу точності, групи складності, маси, марки матеріалу й об'єму виробництва [1];

$S_{вдх}$ – ціна 1 т відходів, грн.

Собівартість лиття в піщано-глинисті форми становить

$$S_1 = \left(\frac{36800}{1000} \cdot 18,7 \cdot 1,1 \cdot 1 \cdot 0,89 \cdot 5,94 \cdot 1 \right) - (18,7 - 10,3) \cdot \frac{14400}{1000} = 3881 \text{ (грн)}.$$

Собівартість лиття в кокіль становить

$$S_2 = \left(\frac{40200}{1000} \cdot 14,5 \cdot 1,1 \cdot 1 \cdot 0,89 \cdot 5,94 \cdot 1 \right) - (14,5 - 10,3) \cdot \frac{14400}{1000} = 3329 \text{ (грн)}.$$

Отже, з економічної точки зору, одержання заготовки литтям у кокіль є раціональнішим.

За результатами розрахунку раціональним способом одержання заготовки вважаємо лиття в кокіль (аналогічно до базового варіанта технологічного процесу виготовлення деталі).

Припуски і допуски на розміри заготовки визначимо відповідно до ДСТУ 8981:2020 [4]. Так, згідно з [4] маємо:

- клас точності розмірів – 9;
- ступінь точності поверхонь – 11;
- ступінь короблення – 2;
- ряд припусків – 4.
- клас точності маси – 10;
- шорсткість поверхонь – не більше ніж $Ra = 20$ мкм;
- мінімальний припуск на бік – 0,4 мм.

Припуски на поверхні й значення загальних допусків наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Визначення розмірів вилівка, в міліметрах

Номинальний розмір	Допуск розміру	Допуск форми	Загальний допуск	Вид механічного оброблення	Ряд припусків	Половина загального допуску	Величина припуску	Розрахунок розміру	Остаточний розмір
150	2,4	0,16 0,40	2,4	Чист. Чорн.	4	1,2	3,1 1,9	$150+3,1+1,9=155$	$155\pm 1,2$
130	2,4	0,50 0,40	2,8	Чист. Чорн.	4	1,4	3,4 2,1	$130+3,4+2,1=135,5$	$136\pm 1,4$
Ø335	3,2	0,50	3,2	Чист.	4	1,6	3,8	$335+3,8\cdot 2=342,6$	$343\pm 1,6$
Ø235	2,8	0,40	3,2	Чорн.	4	1,6	2,3	$235-2,3\cdot 2=230,4$	$230\pm 1,6$
Ø72	2,2	0,16	2,4	Чист.	4	1,2	3,1	$72-3,1\cdot 2=65,8$	$65,5\pm 1,2$
75	2,2	0,32	2,4	Чорн. Чорн.	4	1,2	1,9 1,9	$75+1,9-1,9=75$	$75\pm 1,2$

Ескіз вилівка, одержуваного литтям у кокіль наведений на рисунку 2.1.

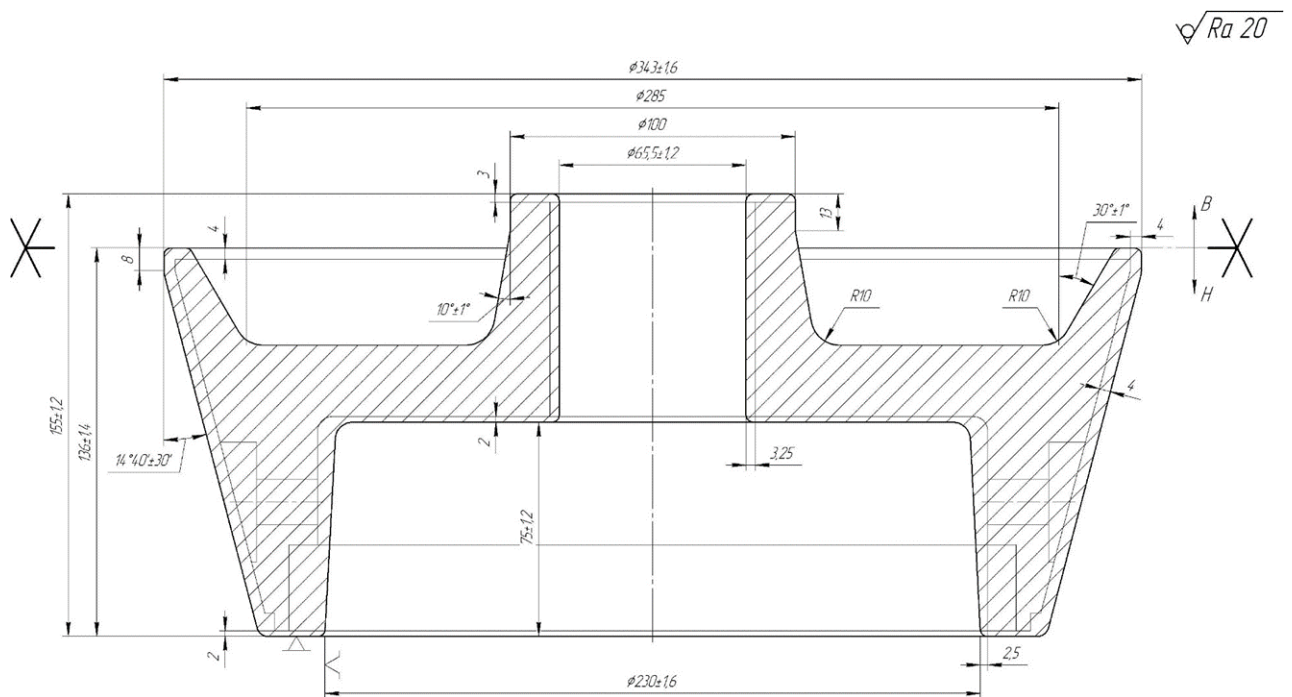


Рисунок 2.1 – Ескіз вилівка

2.3 Аналіз комплексної на обробному центрі з ЧПК операції

2.3.1 Аналіз схеми базування та закріплення заготовки

Згідно з завданням проаналізуємо операцію 065 комплексну на обробному центрі з ЧПК, яка утворена об'єднанням горизонтально-розточувальної та радіально-свердлильної операцій базового технологічного процесу виготовлення деталі. Згідно з табл. 2.1 на операції 065 оброблюють 8 східчастих отворів $\varnothing 42/\varnothing 16H8$ та 8 отворів $\varnothing 12H14$, розміщених на конічній поверхні деталі.

Згідно з базовою технологією зазначені поверхні обробляють згідно з попереднім розмічуванням. Використання розточувального верстата з ЧПК дає змогу підвищити продуктивність оброблення та стабілізувати точність та якість оброблюваних поверхонь заготовки.

Заготовка має низку розвинених поверхонь правильної (плоскої, циліндричної) форми, що можуть претендувати на роль технологічних баз.

З урахуванням сказаного пропонується схема базування, наведена на рисунку 2.2. Наведена схема передбачає установлення заготовки за циліндричним отвором на циліндричному пальці зі шпонкою та упором в торець маточини: заготовка позбавляється 6-ти ступенів вільності: за торцем – установча база; за отвором $\varnothing 38H7$ – подвійна опорна база; за боковою поверхнею шпонкового паза – опорна база.

Точність розміру $\varnothing 16H8$ визначається точністю мірного інструменту (зенкера), його діаметром, ступенем зношення.

Точність розміру $45 \pm 0,31$ мм визначається точністю позиціонування робочих органів верстата, що зазвичай становить 0,02 мм, та похибкою базування $E_{6\ 45} = T_{150} = 0,4$ мм. Оскільки похибка базування $E_{6\ 45} = 0,4$ мм не перевищує допуск на розмір $T_{45} = 0,62$ мм, пропонувану схему базування можна вважати прийнятною.

Точність розміру $\varnothing 42^{+0,62}$ мм здебільшого визначається точністю позиціонування робочих органів верстата, оскільки для одержання поверхні пропонується використовувати контурне фрезерування кінцевою фрезою.

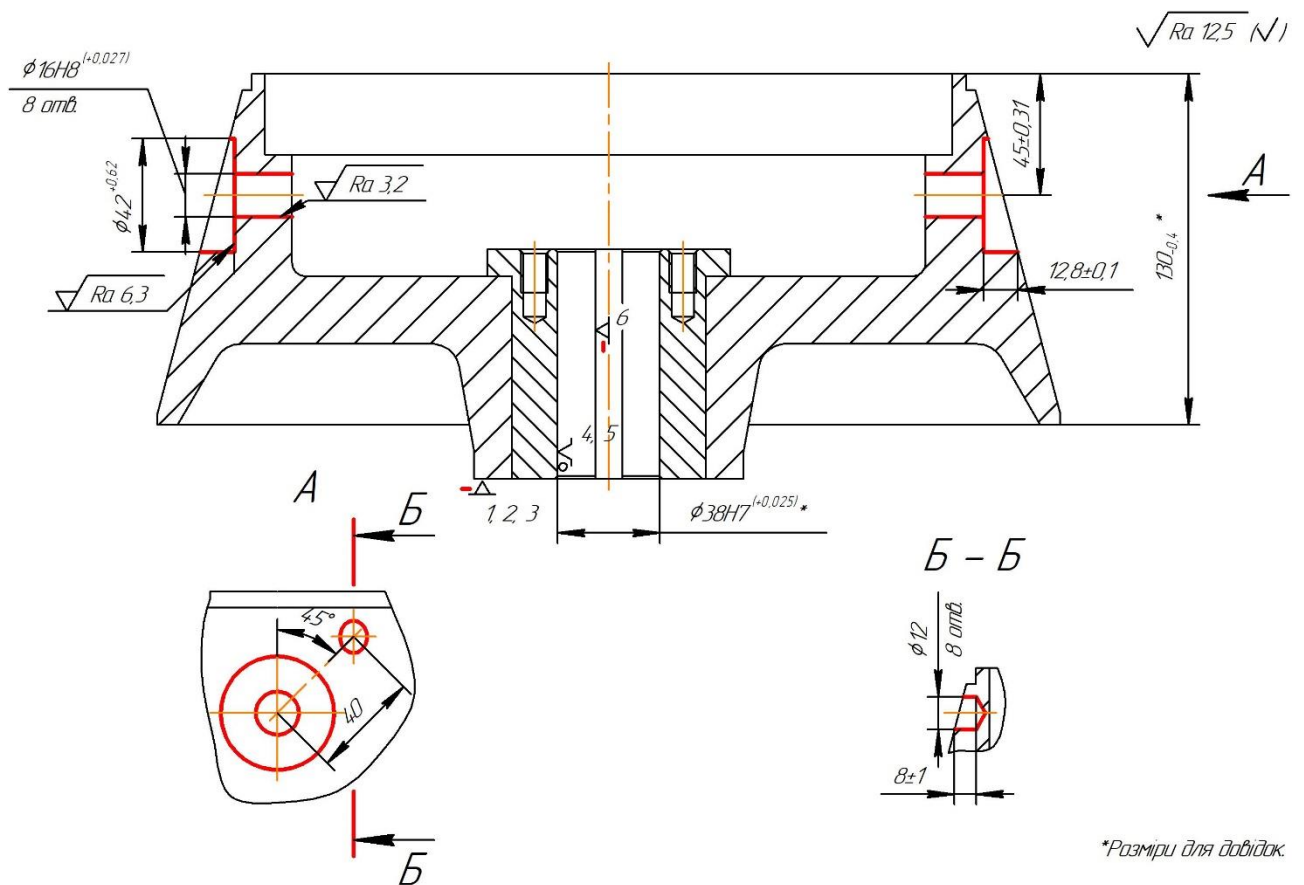


Рисунок 2.2 – Схема базування заготовки на операції 065

Глибина отвору $\varnothing 42$ мм – $h = 12 \pm 0,1$ мм визначається точністю позиціонування робочих органів верстата (0,02 мм) та похибкою базування, що має місце під час установлення заготовки за циліндричним пальцем із зазором [1]:

$$\varepsilon_{\delta} = \delta_1 + \delta_2 + 2\Delta,$$

де δ_1 – допуск на діаметр отвору ($T_{\varnothing 38H7} = 0,025$ мм);

δ_2 – допуск на діаметр пальця ($T_{\varnothing 38g6} = 0,016$ мм);

Δ – мінімальний радіальний зазор в посадці заготовки на пальці ($S_{\min \varnothing 35H7/g6} = 0,009$ мм).

$$\varepsilon_{\delta} = 0,025 + 0,016 + 2 \cdot 0,009 = 0,059 \text{ мм.}$$

Похибка базування (0,1 мм) не перевищує допуск на глибину отвору (0,2 мм), що дозволяє забезпечити необхідну розмірну точність під час оброблення поверхні.

До недоліків розглянутої схеми базування слід віднести незначну площу (протяжність) торця маточини, який використовують як установчу технологічну базу. Незначна площа торця може призвести до втрати стійкого положення заготовки під час оброблення її поверхонь.

Такого недоліку позбавлена альтернативна схема базування заготовки, наведена на рисунку 2.3.

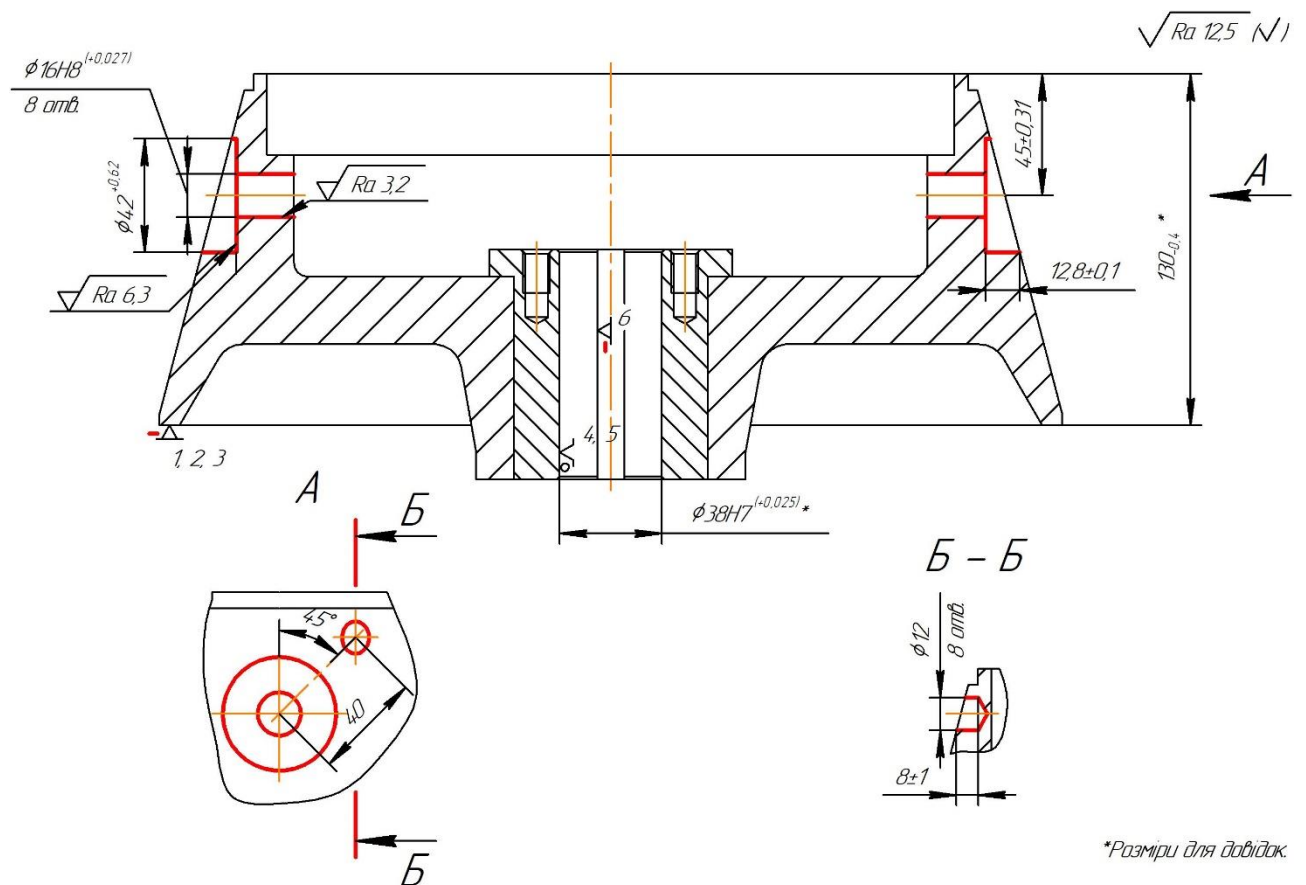


Рисунок 2.3 – Альтернативна схема базування заготовки на операції 065

Тут як установчу технологічну базу використовують торець фланця $\phi 335$ мм, що дозволяє забезпечити більш стійке налагодження.

Наведені схеми базування заготовки є рівноцінними з точки зору забезпечення точності оброблюваних поверхонь, проте схема, наведена на рисунку 2.3 забезпечує більш стійке положення заготовки під час оброблення її поверхонь. Отже, перевагу віддамо схемі базування, наведеній на рисунку 2.3.

2.3.2 Обґрунтування вибору металорізального обладнання

В базовому технологічному процесі для оброблення поверхонь заготовки на горизонтально-розточувальній та радіально-свердлильній операціях використовують відповідно верстати моделей 2622В та 2М55. Зазначені верстати не оснащені засобами автоматизації та як результат, характеризуються низькою продуктивністю та стабільністю забезпечення параметрів точності оброблюваних поверхонь. Використання цих верстатів для оброблення поверхонь заготовки вимагає попереднього розмічування, що знижує ефективність технологічного процесу виготовлення деталі.

Відповідно до типу виробництва (дрібносерійного), схеми базування та закріплення заготовки (див. рисунок 2.3), а також форм та габаритних розмірів заготовки, для оброблення поверхонь східчастого отвору $\varnothing 42/\varnothing 16H8$ (8 отв.) та отвору $\varnothing 12H14$ (8 отв.) вибираємо горизонтальний свердлильно-фрезерно-розточувальний верстат типу обробний центр з ЧПК моделі ЕС-630 (НААС), див. таблицю 2.3.

Таблиця 2.3 – Основні технічні характеристики верстата моделі ЕС-630 (НААС), в міліметрах

Найменування характеристики	Величина
Переміщення шпинделя: - за віссю X - за віссю Y - за віссю Z	1016 940 1016
Шпиндель - максимальна потужність, кВт - максимальна частота обертання, об/хв	22,4 7500
Палета (стіл): - розміри - максимальний діаметр заготовки - максимальна вага заготовки, кг - кількість палет - час заміни палет, с	630×630 1000 680 2 15
Максимальна подача різання, м/хв	12,7
Система автоматичної зміни інструменту - кількість позицій - максимальна вага інструменту, кг	50 13,6

ЕС-630 призначений для серійного виробництва та роботи в автоматичному режимі для оброблення великих деталей та багатомісних затискних стійок, пропонує потужність конуса ISO 50 та збільшену робочу зону, має форсоване переміщення, повну систему 4-ої осі поворотного столу для синхронного руху, а також транспортер видалення стружки з виходом ззаду для ефективного контролю стружки.

2.3.3 Обґрунтування вибору засобів технологічного оснащення

Для установлення та закріплення заготовки відповідно до прийнятої схеми базування (див. рисунок 2.3) беремо спеціальний верстатний пристрій з механізованим (пневматичним) приводом.

При виборі різального та вимірювального інструментів перевагу надаємо стандартному, уніфікованому, див. таблицю 2.4.

Таблиця 2.4 – Відомість технологічної оснастки на операцію 065

Зміст переходу	Різучий інструмент, матеріал ріжучої частини	Допоміжний інструмент	Вимірювальний інструмент
1. Фрезерувати 8 отв. $\varnothing 42^{+0,62}$ мм на глибину $12,8 \pm 0,1$ мм згідно з ескізом	Фреза 035-2223-0101 ОСТ 2И62-2-72 (Z = 4; конус Морзе 2), P6M5	Втулка 19831072 ТУ 2-035-978-85	Штангенциркуль ШЦ 1-125-0,1 ДСТУ EN ISO 13385-1:2018
2. Свердлити 8 отв. $\varnothing 15^{+0,18}$ мм напрохід згідно з ескізом	Свердло 035-2300-1312 ОСТ 2И20-1-80, P6M5	Патрон 191113050 ТУ 2-035-986-85	—
3. Зенкерувати 8 отв. $\varnothing 16H8$ напрохід згідно з ескізом	Зенкер 035-2320-0011 ТУ 2-035-926-83 (конус Морзе 2), P6M5	Втулка 19831072 ТУ 2-035-978-85	Калібр-пробка $\varnothing 16H8$ ПР-НЕ
4. Свердлити 8 отв. $\varnothing 12H14$ на глибину 8 ± 1 згідно з ескізом	Свердло 035-2300-1292 ОСТ 2И20-1-80, P6M5	Патрон 191113050 ТУ 2-035-986-85	Штангенциркуль ШЦ 1-125-0,1 ДСТУ EN ISO 13385-1:2018

Контроль шорсткості оброблюваних поверхонь на робочому місці пропонується виконувати з використанням зразків шорсткості згідно з ГОСТ 9378-93. Остаточний контроль шорсткості оброблюваних поверхонь

пропонується виконувати з використанням профілометра-профілографа лабораторного TS-7.

2.3.4 Визначення режимів різання та технічних норм часу

Режими різання та технічні норми часу на операцію визначимо відповідно до методики [6].

Режими різання за переходами операції 065 комплексної на обробному центрі з ЧПК наведено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Таблиця режимів різання на операцію 065 [6]

Зміст переходу	Глибина різання t, мм	i	Подача S _o , мм/об (S _z , мм/зуб)	Частота обертання, пф, об/хв.	Швидкість різання, V _ф , м/хв.	T _{oΣ} , хв.
1. Фрезерувати 8 отв. Ø42 ^{+0,62} мм на глибину 12,8±0,1 мм згідно з ескізом	2,0	8	0,24 (0,06)	1150	50,57	21,6
2. Свердлити 8 отв. Ø15 ^{+0,18} мм на прохід згідно з ескізом	7,5	8	0,4	1200	56,52	
3. Зенкерувати 8 отв. Ø16H8 на прохід згідно з ескізом	0,5	8	0,8	320	15,9	
4. Свердлити 8 отв. Ø12H14 на глибину 8±1 згідно з ескізом	6	8	0,3	1400	52,75	

Час автоматичної роботи верстата за програмою становить [6]:

$$T_{ca} = T_o + T_{md} = 21,6 + 9,2 = 30,2 \text{ хв,}$$

де $T_{md} = 9,2$ хв – машинно-допоміжний час, що враховує час на зміну позиції столу верстата, зміну інструменту, швидке підведення-відведення інструменту тощо.

Допоміжний час на операцію становить [6]:

$$T_{\delta} = T_{\delta_{уст}} + T_{\delta_{вим}} + T_{\delta_{он}} = T_{\delta} = 3,0 + 0,32 + 0,2 = 3,34 \text{ хв.}$$

Час на організацію та технічне обслуговування робочого місця, відпочинок та особисті потреби ($a_{\text{тех}} + a_{\text{орг}} + a_{\text{вдп}}$) відповідно [6] становить 14 %.

В такому разі норма штучного часу становить

$$T_{\text{шт}} = (T_{\text{за}} + T_{\text{д}} \cdot K_{\text{ід}}) \cdot \left(1 + \frac{a_{\text{тех}} + a_{\text{орг}} + a_{\text{вдп}}}{100}\right) = (30,2 + 3,34) \cdot \left(1 + \frac{14}{100}\right) = 42,04 \text{ хв.}$$

де $K_{\text{ід}}$ – поправочний коефіцієнт на допоміжний час ($K_{\text{ід}} = 1$).

Підготовчо-заклучний час визначають відповідно до рекомендацій [6] становить

$$T_{\text{н.з}} = 4 + 9 + 2 + 2 + 1,2 + 0,2 + 0,25 + 1 + 1,2 + 1,2 + 6 + 0,3 = 28,35 \text{ хв.}$$

Норму штучно-калькуляційного часу визначають за формулою

$$T_{\text{шк}} = T_{\text{шт}} + \frac{T_{\text{нз}}}{n} = 42,04 + \frac{28,35}{29} = 43,02 \text{ хв,}$$

де $n = 29$ – кількість деталей в партії, шт.

2.4 Проектування верстатного пристрою

Завдання: спроектувати верстатний пристрій для базування та закріплення заготовки на операції комплексній на обробному центрі з ЧПК 065.

Основною метою проектування верстатного пристрою є підвищення продуктивності та стабілізація параметрів точності оброблюваних поверхонь заготовок, що вирішується зокрема за рахунок впровадження механізованого приводу закріплення заготовки.

Згідно з існуючим технологічним процесом виготовлення «диска 4.2303.100 СК», заготовку оброблюють з використанням універсального налагоджувального пристрою з ручним приводом закріплення.

Аналіз можливих схем базування заготовки на операції 065 виконаний у п. 2.3.1 цієї роботи. Так, для оброблення поверхонь заготовки на комплексній операції запропоновано схему базування (див. рисунок 2.3) з використанням установчої бази – за торцем заготовки, подвійної опорної бази – за центральним отвором втулки $\varnothing 38H7$, та опорної бази – за боковою поверхнею шпонкового паза втулки. Водночас заготовка позбавляється поступального переміщення

вздовж центральної осі (вісь Z) та обертань навколо осей X та Y (установча база), поступальних переміщень вздовж осей X та Y (подвійна опорна база), обертання навколо центральної осі Z (опорна база): реалізується повний комплект баз.

Щоб система стала врівноваженою під час оброблення заготовки, останню необхідно позбавити можливості поступального переміщення за координатою віссю Z , тобто вгору.

Для визначення взаємного впливу групи збурювальних та врівноважувальних сил було побудовано схему закріплення заготовки з графічною моделлю збурювальних сил у взаємозв'язку з прийнятою схемою базування (див. рисунок 2.4). Схему полів збурювальних сил було побудовано для переходу фрезерування, що характеризується найбільшими силами різання, за максимальною складовою сили різання.

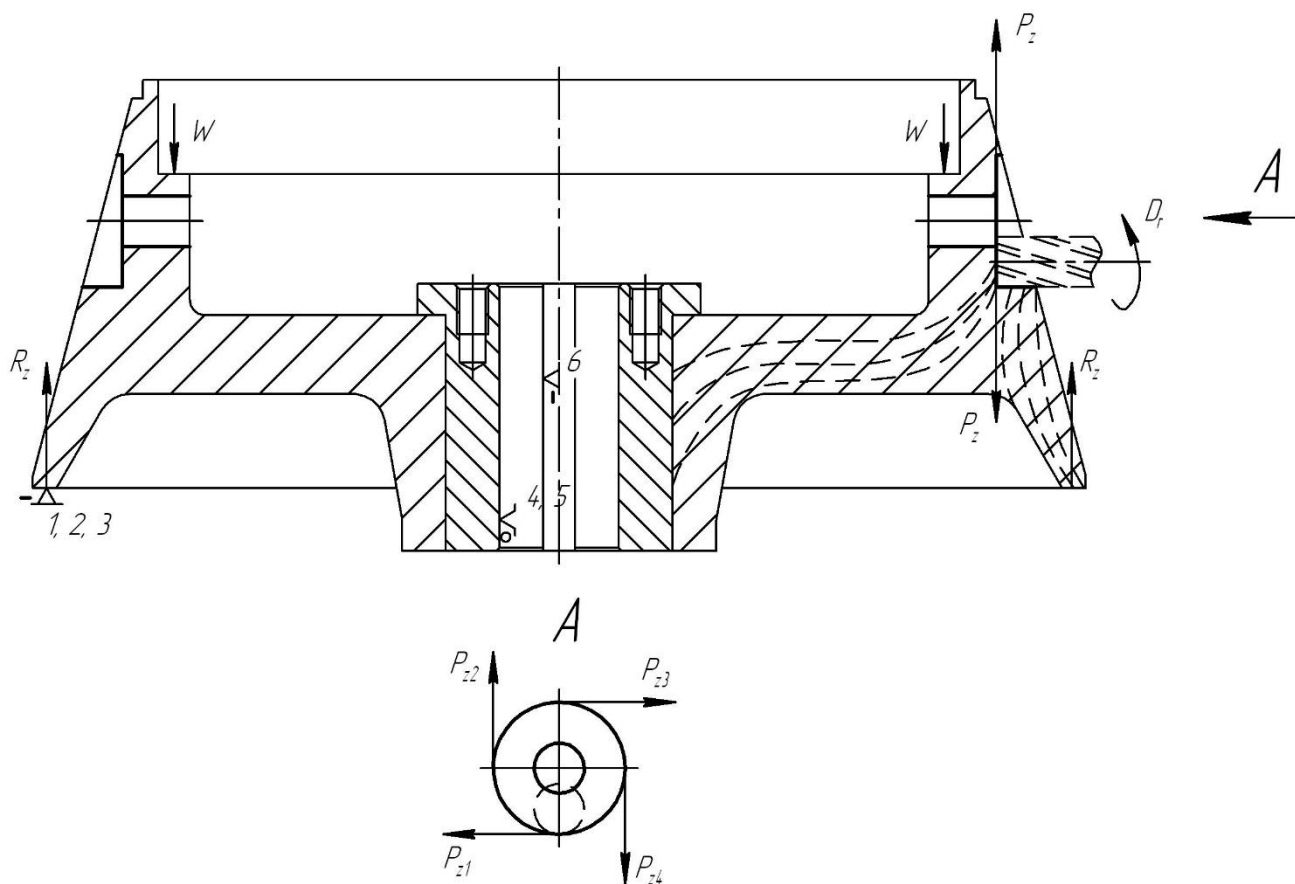


Рисунок 2.4 – Схема закріплення заготовки з полем збурювальних та врівноважувальних сил

Складові сили різання P_z розташовані вертикально, прагнуть або відірвати заготовку від пристосування вгору, або притискають її вниз, до опор. Сили, що притискають заготовку до опор, врівноважуються реакціями опор. Сили, що відривають заготовку від опор необхідно врівноважувати силами закріплення W . Складові P_z , розташовані горизонтально – прагнуть повернути заготовку щодо своєї центральної осі, створюючи крутний момент, або змістити її поступово в горизонтальній площині. Ці сили та моменти врівноважені реакціями опор, які реалізуються циліндричним пальцем зі шпонкою та не вимагають застосування сил закріплення.

За такої схеми закріплення заготовки раціональним слід визнати закріплення останньої за допомогою пневмокамери двосторонньої дії, яка створить поле врівноважувальних сил, необхідне для запобігання зміщенню заготовки під час її оброблення.

Величину сумарного зусилля закріплення необхідно визначати з умови не відривання заготовки від опори під дією сили P_z вгору:

$$W = P_z \cdot K_{зан}.$$

де W – сила закріплення заготовки, Н;

$K_{зан}$ – коефіцієнт запасу, що враховує умови закріплення заготовки.

$$K_{зан} = K_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6,$$

де K_0 – коефіцієнт гарантованого запасу;

K_1 – коефіцієнт, що враховує збільшення сил різання у зв'язку з наявністю випадкових нерівностей на оброблюваних поверхнях заготовки;

K_2 – коефіцієнт, що враховує збільшення сил різання в результаті затуплення ріжучого інструмента;

K_3 – коефіцієнт, що враховує переривчастість різання;

K_4 – коефіцієнт, що характеризує постійність сил закріплення;

K_5 – коефіцієнт, що враховує ергономіку ручних пристроїв;

K_6 – коефіцієнт, що враховує моменти, що намагаються повернути заготовку на опорах.

$$K = 1,5 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 1,8.$$

Оскільки розрахункова величина коефіцієнту запасу не перевищує 2,5, беремо $K_{зан} = 2,5$ [1].

Недоліком вибраного способу закріплення заготовки є високий рівень енергетичних витрат.

Заготовка характеризується великою жорсткістю, отже, можна не побоюватися відхилення розмірів, форми та розміщення її поверхонь під час закріплення у пристрої.

Попередній аналіз показує, що найбільш напружені режими різання на операції спостерігаються для фрезеруванні отвору діаметром 42Н14 кінцевою фрезою. Попередньо встановлено, що при фрезеруванні кінцевою фрезою тангенціальна складова сили різання P_z не перевищує 1500 Н.

Як силовий привод має сенс використовувати пневмокамеру двосторонньої дії з діаметром камери $D_k = 125$ мм, яка дозволяє у положенні близькому до початкового розвинути зусилля на штоку $Q = 3,5$ кН [1].

Визначимо параметри точності пристрою, які більшою мірою впливають на досягнення заданих допусків оброблюваної деталі. До розрахункових параметрів слід віднести точність взаємного розміщення ОКБ та ДКБ пристрою, а саме: паралельність опорної поверхні установчого елемента пристрою щодо його основи. Як обмежувальний фактор розглянемо відхилення від паралельності осі оброблюваного східчастого отвору щодо торцевої поверхні заготовки діаметром 335 мм. Це відхилення робочим кресленням деталі не регламентовані, а його допустима величина згідно з чинним стандартом, повинна знаходитися в межах 60 % від допуску на розмір 85js14, що визначає положення оброблюваних отворів за висотою:

$$T_{//} = 0,6 \cdot 0,87 = 0,522 \approx 0,5 \text{ мм.}$$

Допустиму похибку виготовлення пристрою визначають за формулою

$$E_{np //} = T_{//} - K \sqrt{(K_1 \cdot E_6)^2 + E_3^2 + E_y^2 + E_u^2 + E_n^2 + (K_2 \cdot \omega)^2},$$

де $K = 1,2$ – коефіцієнт, що враховує можливе відхилення від нормального закону розподілення окремих складових рівняння;

$K_1 = 0,8$ – враховується для випадків, коли $E_6 \neq 0$;

E_6 – похибка базування, беремо $E_6 = 0$;

E_3 – похибка закріплення, у нашому випадку напрям сили закріплення не впливає на параметр, що витримується, і, значить, $E_3 = 0$;

E_y – похибка установлення пристрою на верстаті $E_y = 0$ мкм;

E_{zn} – похибка від зношення установчих елементів пристрою, беремо $E_{zn} = 10$ мкм;

E_n – похибка установки й прекосу інструмента на верстаті, беремо $E_n = 10$ мкм;

$K_2 = 0,6$ – коефіцієнт, що враховує ймовірність появи похибки оброблення поверхні;

$\omega = 500$ мкм – середня економічна точність оброблення отвору свердлінням.

Для зазначених умов маємо

$$E_{np //} = 500 - 1,2 \sqrt{0^2 + 0^2 + 0^2 + 10^2 + 10^2 + (0,6 \cdot 500)^2} = 139,6 \text{ мкм.}$$

З урахуванням одержаних даних беремо допуск на відхилення від паралельності опорної поверхні установчого елемента пристрою щодо його основи 0,12 мм. Цей допуск слід зазначити в технічних вимогах на складальному кресленні пристрою.

Короткий опис будови та принципу дії пристрою.

Оброблювану заготовку встановлюють торцем діаметром 335 мм на опорну поверхню оправки 2 з одночасним центруванням за отвором $\varnothing 38H7$ щодо пальця $\varnothing 38g6$. Прихват 4 встановлюють на тягу 5 під гайку 11 і півсферичні шайби 14, 15 і фіксують швидкознімною шайбою 6. Потім за допомогою крана керування, що входить до складальної одиниці 1, у верхню порожнину пневмокамери подають повітря, що переміщає діафрагму з

тарілками, штоком, тягою і прихватом 4 вниз. В результаті відбувається закріплення заготовки. Після оброблення заготовки у зворотній послідовності відбувається розкріплення заготовки. Краном керування перекривають подачу повітря у верхню порожнину і відкривають подачу повітря в нижню порожнину камери, внаслідок чого діафрагма з тарілками, штоком, тягою 5 та прихватом 4 переміщуються вгору, звільняючи заготовку від сил закріплення.

2.5 Висновок

1. Відповідно до зауважень, сформульованих за результатами аналізу базової технології виготовлення диска 4.2303.100 СК, було складено маршрут перспективного технологічного процесу виготовлення деталі, що відрізняється повсюдним застосуванням верстатів та обробних центрів з ЧПК та використанням верстатних пристроїв з механізованими приводом закріплення заготовки.

2. Шляхом техніко-економічного обґрунтування підтверджено раціональність вибору способу одержання первинної заготовки – лиття в кокіль.

3. Для підвищення продуктивності та стабілізації параметрів точності оброблюваних поверхонь заготовки на комплексній операції з ЧПК було спроектовано верстатний пристрій з пневматичним приводом закріплення заготовки. Розроблені специфікація та складальне креслення верстатного пристрою.

4. Для перевірки правильності прийнятих проектних рішень пропонується дослідити пропоновану конструкцію верстатного пристрою в системі з заготовкою методами статичного та динамічного аналізу.

РОЗДІЛ 3

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ ВЕРСТАТНОГО ПРИСТРОЮ

3.1 Актуальність, мета та методи дослідження

Верстатний пристрій є невід'ємною частиною технологічної обробної системи, до складу якої зазвичай також відносять верстат, заготовку (деталь) та різальний інструмент. В умовах багатомоделного виробництва, притаманного світу в останні десятиліття, роль верстатних пристроїв, що виконують функцію базування та закріплення різноманітних за конфігурацією виробів на верстаті постійно збільшується, що у свою чергу викликає постійний інтерес з боку дослідників.

Точність, продуктивність та надійність закріплення заготовки в пристрої в першу чергу визначається кількістю та місцем розташування опорних елементів та елементів затискання [7]. Компонування верстатного пристрою з визначенням точок розташування опорних елементів та затискачів є складним завданням, що потребує значного досвіду від проєктувальника. Тут на допомогу проєктувальнику приходять сучасні комп'ютерні методи дослідження [8–10]. Точність верстатного пристрою робить свій вклад в точність оброблення поверхонь заготовки [11–13]. Правильність рішень прийнятих під час проєктування конструкції верстатного пристрою може бути підтверджена чисельними розрахунками та моделюванням [14–17]. Важливим аспектом є уникнення деформацій заготовки, викликаних системою затискання [17, 18].

Таким чином, якість верстатного пристрою має прямий вплив на продуктивність і повторюваність виробничої системи, а також на якість кінцевого продукту. Доказом цього є те, що приблизно 40% бракованих деталей спричинені помилками у визначенні розмірів, які можна віднести до погано спроектованих/сконструйованих пристроїв [17]. Отже, проєктування та

конструювання верстатного пристрою, оптимізацію прийнятих проєктних рішень можна вважати актуальним завданням.

В розділі 2 цієї роботи спроектовано верстатний пристрій для базування та закріплення заготовки на горизонтально-розточувальній. Згідно з завданням розроблені специфікація та складальне креслення верстатного пристрою.

Отже метою дослідження є структурно-параметрична оптимізація верстатного пристрою для базування та закріплення заготовки на горизонтально-розточувальній операції.

Одним з найважливіших показників, що визначає працездатність будь-якої машинобудівної конструкції, механізму, машини є її статичні характеристики, що у свою чергу визначаються напружено-деформованим станом конструкції в умовах статичних навантажень. Основним завданням в цьому аспекті є проєктування конструкції з дотриманням умов, коли величини статичних характеристик не перевищують межі допустимих норм. Зазвичай до статичних характеристик досліджуваної конструкції відносять «загальні переміщення», «пружні деформації» та «внутрішні напруження». Зокрема допустимі норми «загальних переміщень» та «внутрішніх напружень» для системи «пристрій-заготовка» визначаються відповідно обмеженнями щодо точності оброблюваних поверхонь (допусками на їх розміри, взаємне розміщення поверхонь тощо) та межею текучості матеріалів компонентів системи.

В останні роки на перший план виходять вимоги щодо матеріаломісткості виробів, що вимагає зокрема від проєктувальників верстатних пристроїв рішень з мінімальними витратами матеріалів. Тут на допомогу проєктувальникам приходять метод топологічної оптимізації, критерієм оптимальності якого зазвичай є мінімальна маса виробу. Питанням топологічної оптимізації механічних конструкцій з використанням систем інженерного налізу останнім часом присвячено велику кількість досліджень [19–23].

Останнім етапом дослідження машинобудівних конструкцій зазвичай є динамічний (гармонічний та/або модальний) аналіз [24–26]. Динамічний аналіз конструкції дозволяє визначити її характеристики в умовах дії динамічних

навантажень. Відомо, що за умови співпадіння частот власних коливань та частот вимушених коливань амплітуда коливань системи збільшується (резонанс). Збільшення амплітуди коливань системи «пристрій-заготовка» призводить до збільшення похибок розмірів та якості оброблюваних поверхонь. Отже, одним із основних завдань проєктувальника є створення такої конструкції верстатного пристрою, що буде сталою в умовах дії динамічних навантажень та не призведе до виникнення резонансу.

Сучасні програми інженерного аналізу, робота яких ґрунтується на основі використання методу скінченних елементів [27] дозволяють реалізувати аналіз напружено-деформованого стану, динамічний аналіз та топологічну оптимізацію конструкцій якісно та продуктивно. До таких програм зокрема можна віднести Ansys Workbench [28], що в середовищі інженерів-проєктувальників вважається стандартом номер один завдяки комплексності та функціональності.

Ansys Workbench має модулі:

- Static Structural – для аналізу напружено-деформованого стану конструкції;
- Modal – для динамічного аналізу конструкції;
- Structural Optimization – для топологічної оптимізації конструкції.

3.2 Аналіз напружено-деформованого стану конструкції верстатного пристрою

Для дослідження напружено-деформованого стану конструкції пропонованого верстатного пристрою в системі графічного дизайну SolidWorks було побудовано твердотільну модель системи «пристрій-заготовка», до складу якої увійшли лише ті основні елементи, що беруть безпосередню участь у формуванні силових полів: диск (заготовка), оправка в зборі з пальцем, тяга (шток), прихват, швидкознімальна шайба, півсферичні шайби (верхня й нижня), гайка. На рис. 3.1 наведено імпортовану в програму Ansys Workbench (модуль «статичний аналіз» або Static Structural) твердотільну модель системи «пристрій-заготовка».

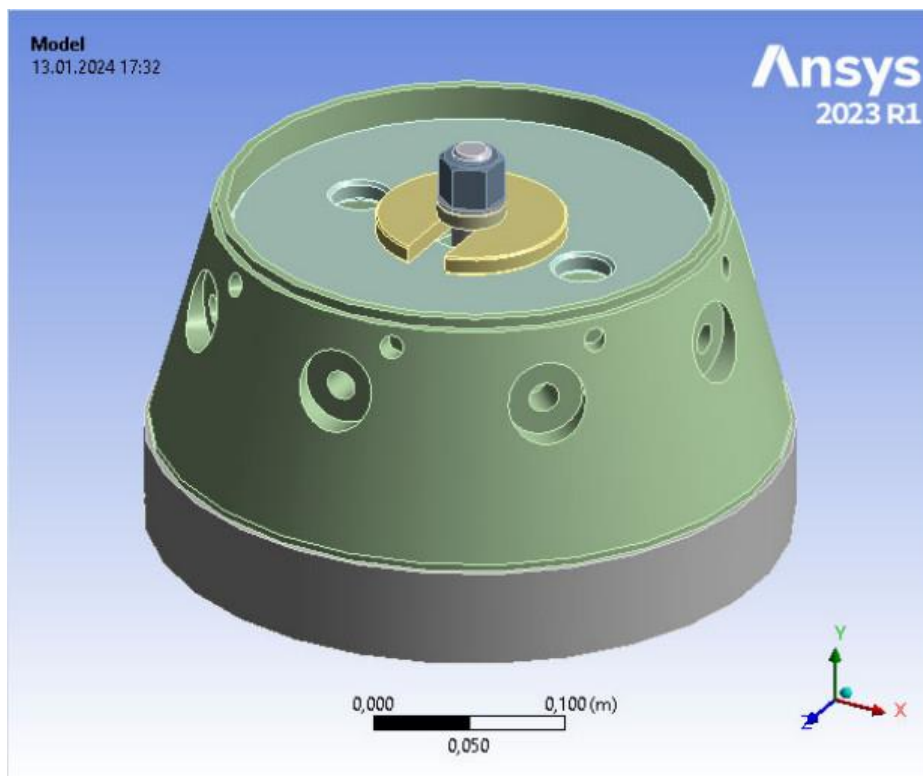


Рисунок 3.1 – Модель системи «пристрій-заготовка»

Для підвищення ступеня достовірності результатів розрахунку моделі були задані характеристики сполучень поверхонь компонентів, що увійшли до складу досліджуваної моделі (див. рис. 3.2 та 3.3).

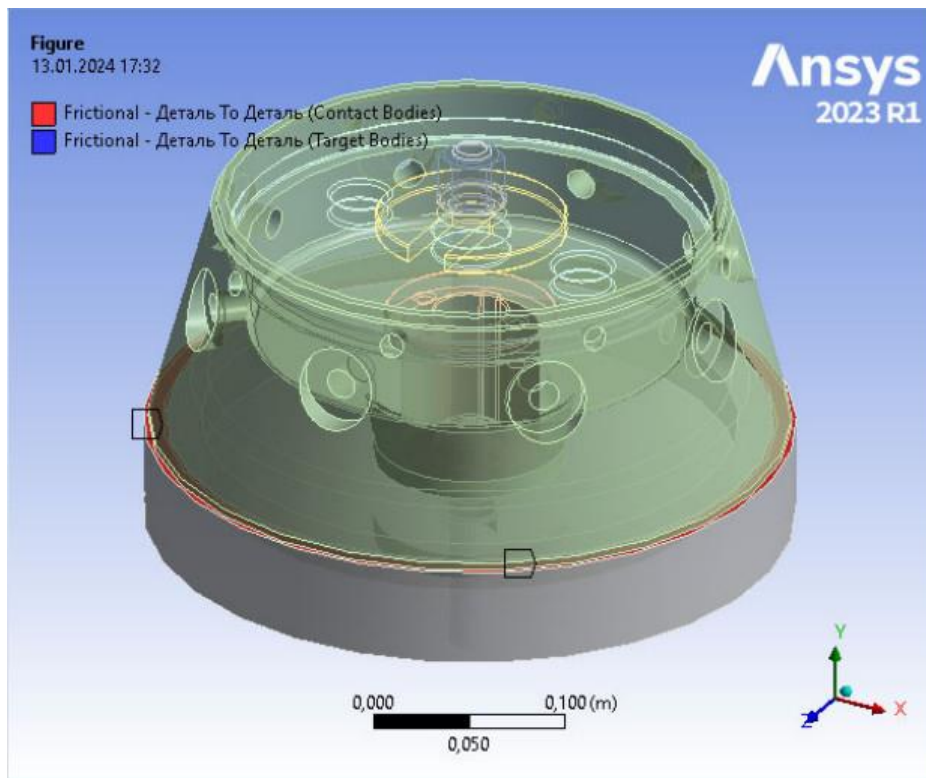


Рисунок 3.2 – Тертя ковзання (Frictional), як характеристика контакту сполучених поверхонь в системі «пристрій-заготовка»

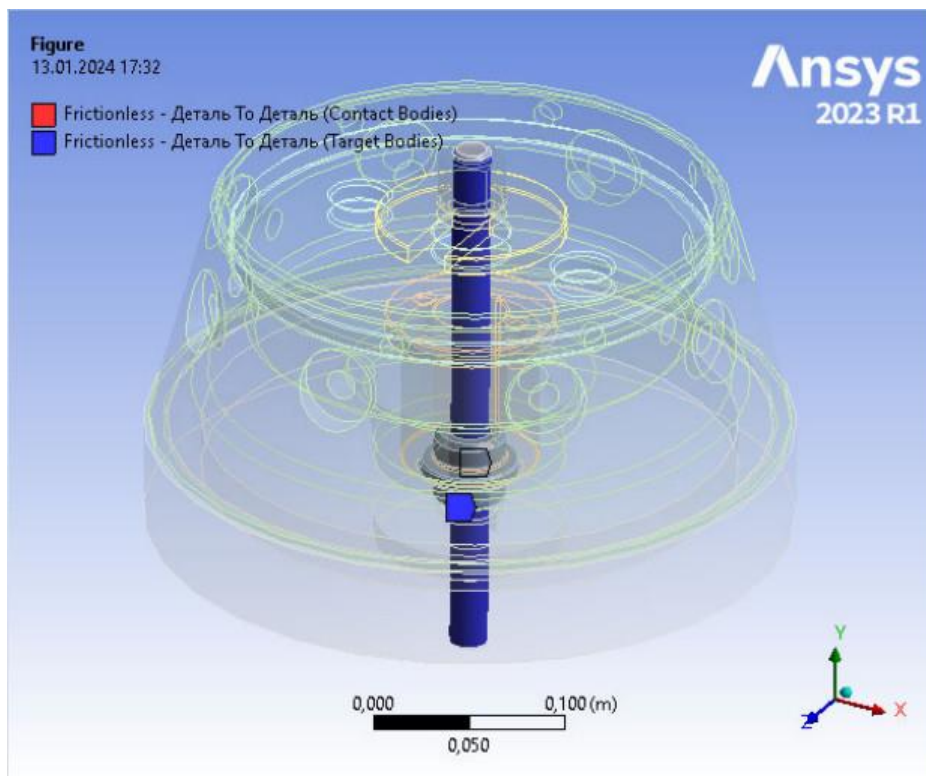


Рисунок 3.3 – Відсутність тертя (Frictionless), як характеристика контакту сполучених поверхонь в системі «пристрій-заготовка»

Так, для пари компонентів «заготовка-оправка» (див. рис. 3.2) було задано характеристику «тертя ковзання» (Frictional) з коефіцієнтом тертя 0,16, що відповідає сполученню чисто оброблених поверхонь сталевих деталей. Характеристика «тертя ковзання» (Frictional) з коефіцієнтом тертя 0,16 були також задані для пар «прихват-заготовка», «швидкознімальна шайба-прихват», «гайка-півсферична шайба». Оскільки функціональним призначенням пари півсферичних шайб є компенсація перекосів прихвата для забезпечення рівномірного навантаження основи гайки, для них було задано коефіцієнт тертя 0,1.

Для пари «тяга-палець» було задано характеристику «відсутність тертя» (Frictionless), що охарактеризувати взаємне переміщення компонентів за наявності гарантованого зазору у з'єднанні. «Відсутність тертя» (Frictionless) також було задано для пари «тяга-швидкознімальна шайба».

Для всіх інших сполучень було задано характеристику за замовчуванням – «жорсткий зв'язок» (Bonded), що у першому наближенні дозволяє розглядати пару компонентів як єдине ціле.

Розрахунок напружено-деформованого стану досліджуваної конструкції в Ansys Workbench базується на використанні методу скінченних елементів, що потребує побудови скінченно-елементної моделі досліджуваної конструкції. На рис. 3.4 наведено скінченно-елементну модель досліджуваної системи «пристрій-заготовка», побудовану в автоматичному адаптивному режимі. Адаптивність побудови скінченно-елементної моделі дозволяє задати розміри елементів різної величини. Для крупних компонентів загалом задається великий крок скінченних елементів. В безпосередній близькості від місць розташування конструктивних елементів у вигляді отворів, канавок, або для дрібних компонентів задається дрібний крок скінченних елементів. Такий підхід дозволяє збільшити кількість елементів в місцях потенційної концентрації напружень та зменшити кількість елементів за умови їх відсутності. В такому разі загалом забезпечується висока точність та продуктивність розрахунків моделі.

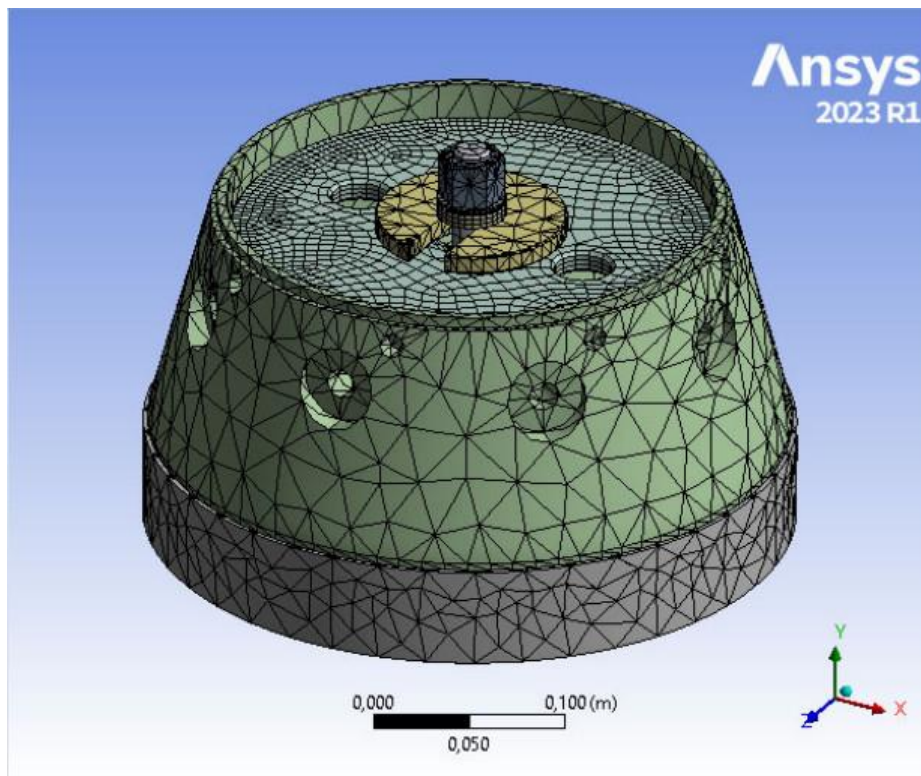


Рисунок 3.4 – Побудова скінченно-елементної моделі системи «пристрій-заготовка»

В результаті було побудовано скінченно-елементну модель з такими характеристиками: мінімальна довжина грані елемента – 0,47 мм, кількість скінченних елементів – 35120.

Матеріал усіх компонентів досліджуваної системи (за замовчуванням) – середньовуглецева конструкційна сталь (межа міцності на розрив – 460 МПа, межа текучості – 260 МПа).

Для підвищення ступеня достовірності результатів розрахунку моделі були задані такі граничні умови (див. рис. 3.5):

- 1) «фіксована основа» (Fixed Support) – задано для основи оправки;
- 2) «сила» (Force) – задано для нижнього торця тяги в розмірі 3500 Н, як сила, що діє на тягу з боку механізованого приводу закріплення заготовки;
- 3) «момент» (Moment) – задано для поверхні оброблюваного отвору в розмірі 31,5 Н·м, як момент, що діє на заготовку та систему «пристрій-заготовка» загалом з боку процесу різання.

В результаті розрахунку моделі одержані епюри «загальних переміщень» (рис. 3.6), «пружних деформацій» (рис. 3.7), «внутрішніх напружень» (рис. 3.8).

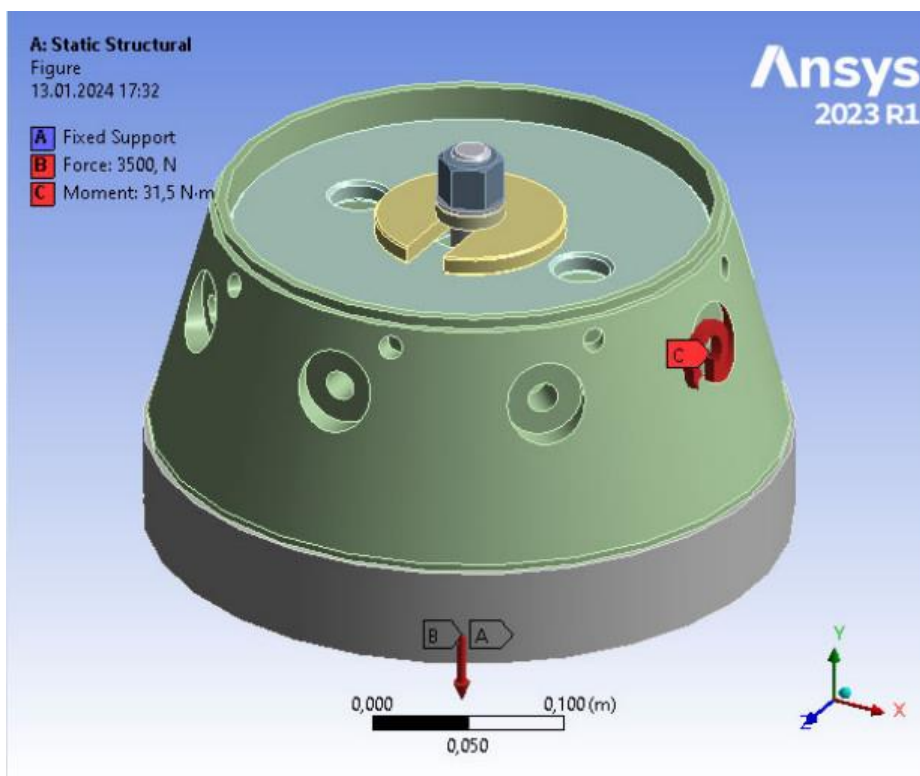
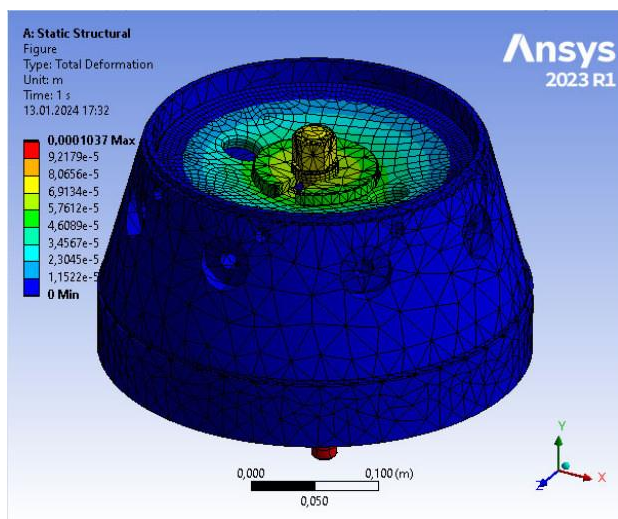
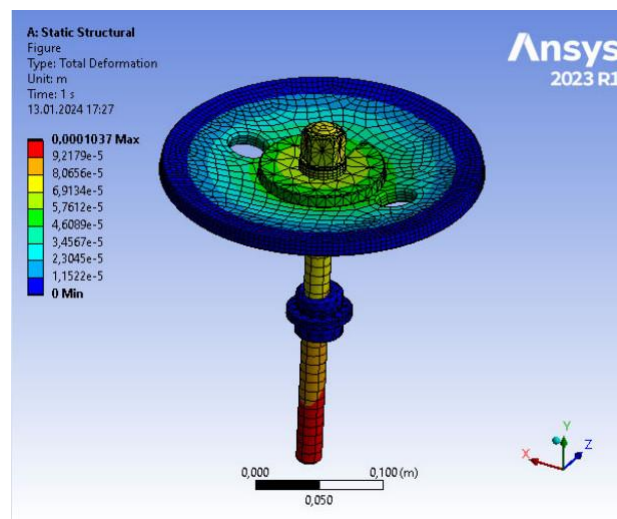


Рисунок 3.5 – Граничні умови в системі «пристрій-заготовка»

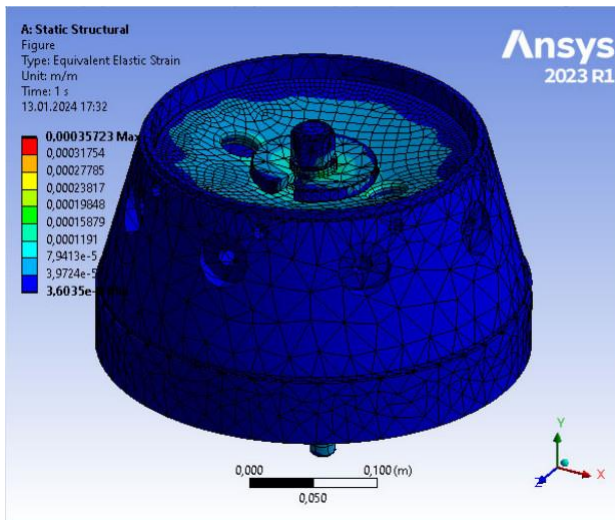


а

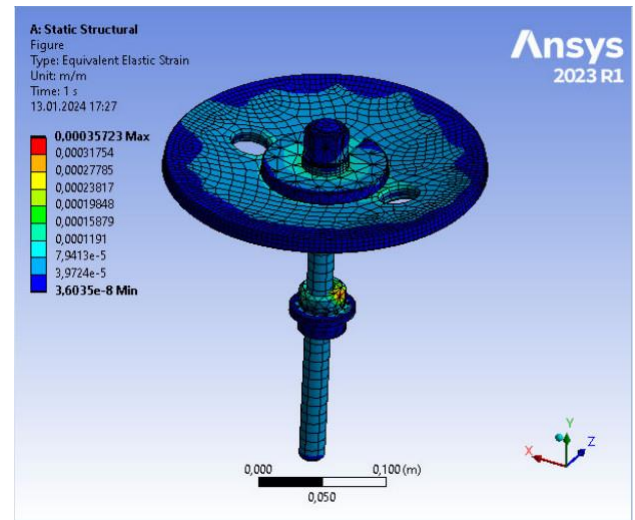


б

Рисунок 3.6 – Епюра «загальних переміщень» в системі «пристрій-заготовка»

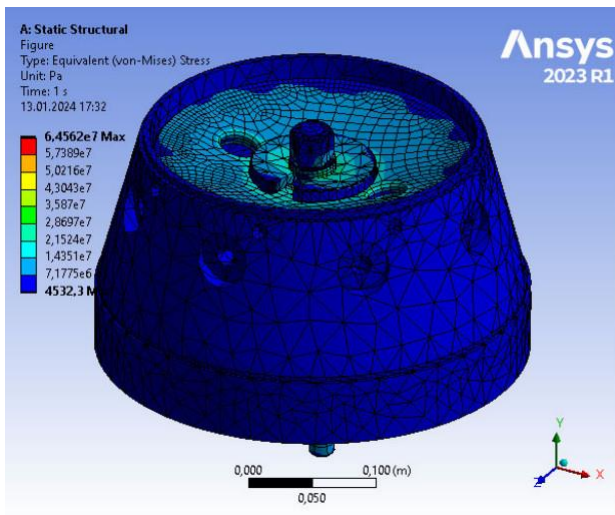


а

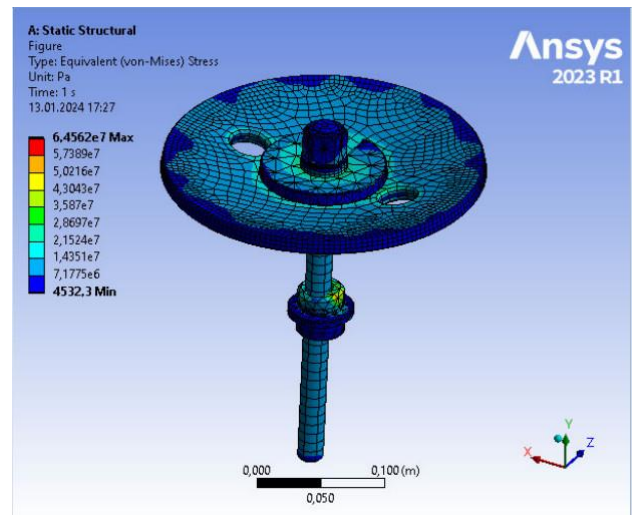


б

Рисунок 3.7 – Епюра «пружних деформацій» в системі «пристрій-заготовка»



а



б

Рисунок 3.8 – Епюра «внутрішніх напружень» в системі «пристрій-заготовка»

Аналіз наведених епюр «загальних переміщень» (див. рис. 3.6) показав максимальне значення 0,1037 мм, що за результатами експертного оцінювання є допустимою величиною. Значення 0,1037 мм характерне кінцівці тяги (штоку) верстатного пристрою, що можна пояснити кінематикою пристрою (особливостями його функціонування). Наступне за рівнем значення переміщень притаманне швидкознімальній шайбі, півсферичним шайбам та гайці ($\approx 0,07$ мм),

що також є допустимим, оскільки не впливає безпосередньо на забезпечення технічних вимог до оброблюваних поверхонь заготовки.

Епюра «пружних деформацій» (див. рис. 3.7) показала максимальне значення 0,35723 мм/м. Інформація про пружні деформації на нашу думку має умовний характер. Пружні деформації слід розглядати під час порівняння різних варіантів конструкцій. На цьому етапі дослідження інші конструкції для порівняння відсутні.

Аналіз наведених епюр «внутрішніх напружень» (див. рис. 3.8) показав максимальне значення 64,562 МПа, що за результатами експертного оцінювання є допустимою величиною, оскільки вона не перевищує межу текучості, характерну для середньовуглецевої конструкційної сталі (250 МПа). Зазначимо, що максимальний рівень внутрішніх напружень характерний для зовнішньої поверхні пальця. Такі напруження пояснюються зміщенням та тиском тяги в поперечному напрямку в бік пальця. Саме зміщення тяги в поперечному напрямку пояснюється наявністю в конструкції швидкознімної шайби пазу. Якщо верхня кінцівка тяги зміщується за пазом, то нижня кінцівка тяги буде зміщуватись в протилежному напрямку, водночас здійснюючи тиск на палець.

Отже, результати розрахунку напружено-деформованого стану досліджуваної системи «пристрій-заготовка» показали прийнятність рішень за роботи системи в умовах статичних навантажень та з певним запасом за переміщеннями та внутрішніми напруженнями. Слід зазначити, що прийнятність пропонуваніх проектно-конструкторських рішень не означає їх оптимальність.

Для підвищення ефективності проектно-конструкторських рішень було запропоновано розглянути альтернативні конфігурації прихвату.

Ескіз прихвата за первинним виконанням (виконанням А) наведено на рис. 3.9. Так, конструкція прихвата являє собою диск діаметром 252 мм висотою 12 мм з центральним отвором діаметром 40 мм та двома отворами діаметром 30 мм. Діаметр 252 мм обумовлений необхідністю перекриття прихватом поверхні заготовки для її ефективного закріплення з рівномірним розподіленням сили закріплення. Діаметр центрального отвору 40 мм обумовлений

особливостями експлуатації пристрою: необхідністю періодичного вільного зняття та установлення прихвата через тягу в комплекті з півсферичними шайбами та гайками. Отвори діаметром 30 мм необхідні для зручного зняття та установлення прихвата під час експлуатації верстатного пристрою.

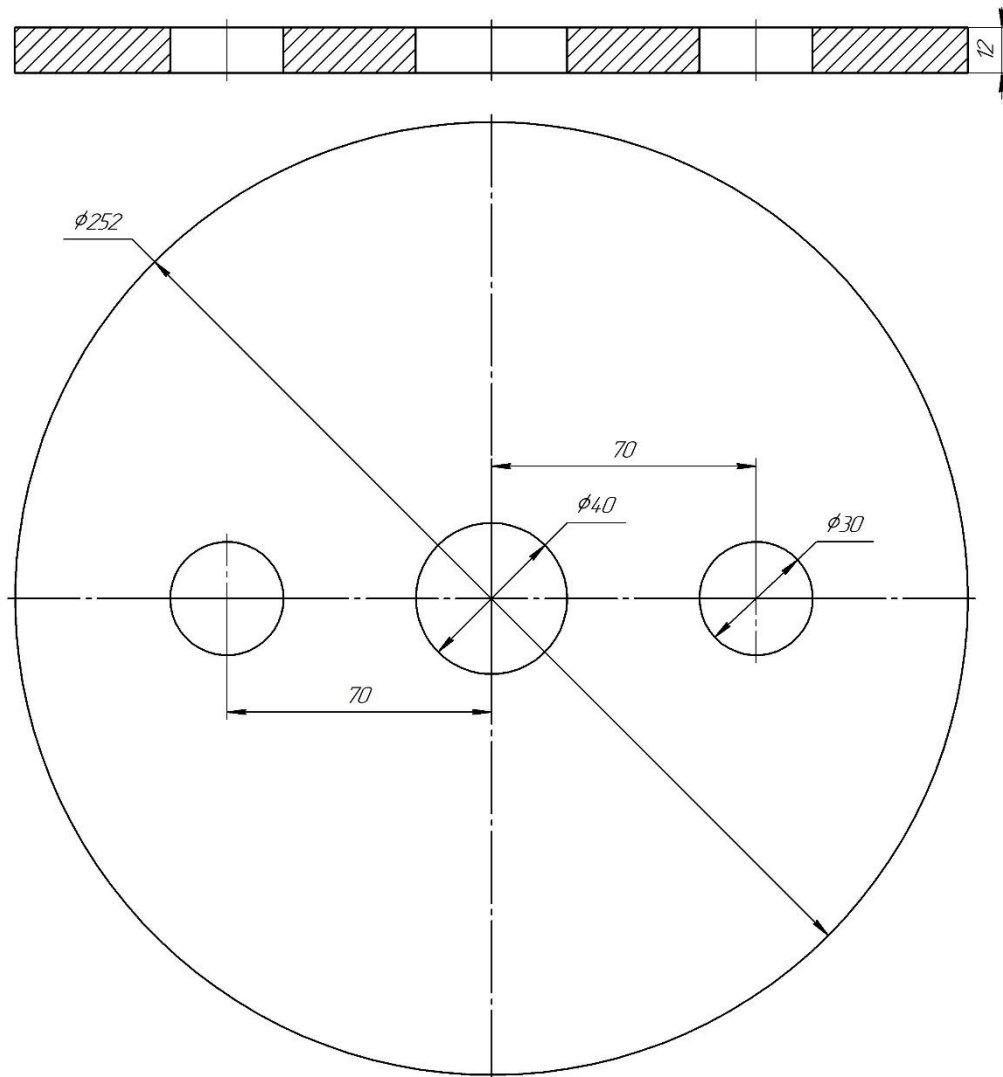


Рисунок 3.9 – Ескіз прихвата (виконання А)

Експертний аналіз первинної конструкції прихвата та системи «пристрій-заготовка» загалом надав можливість запропонувати альтернативну конструкцію (див. рис. 3.10).

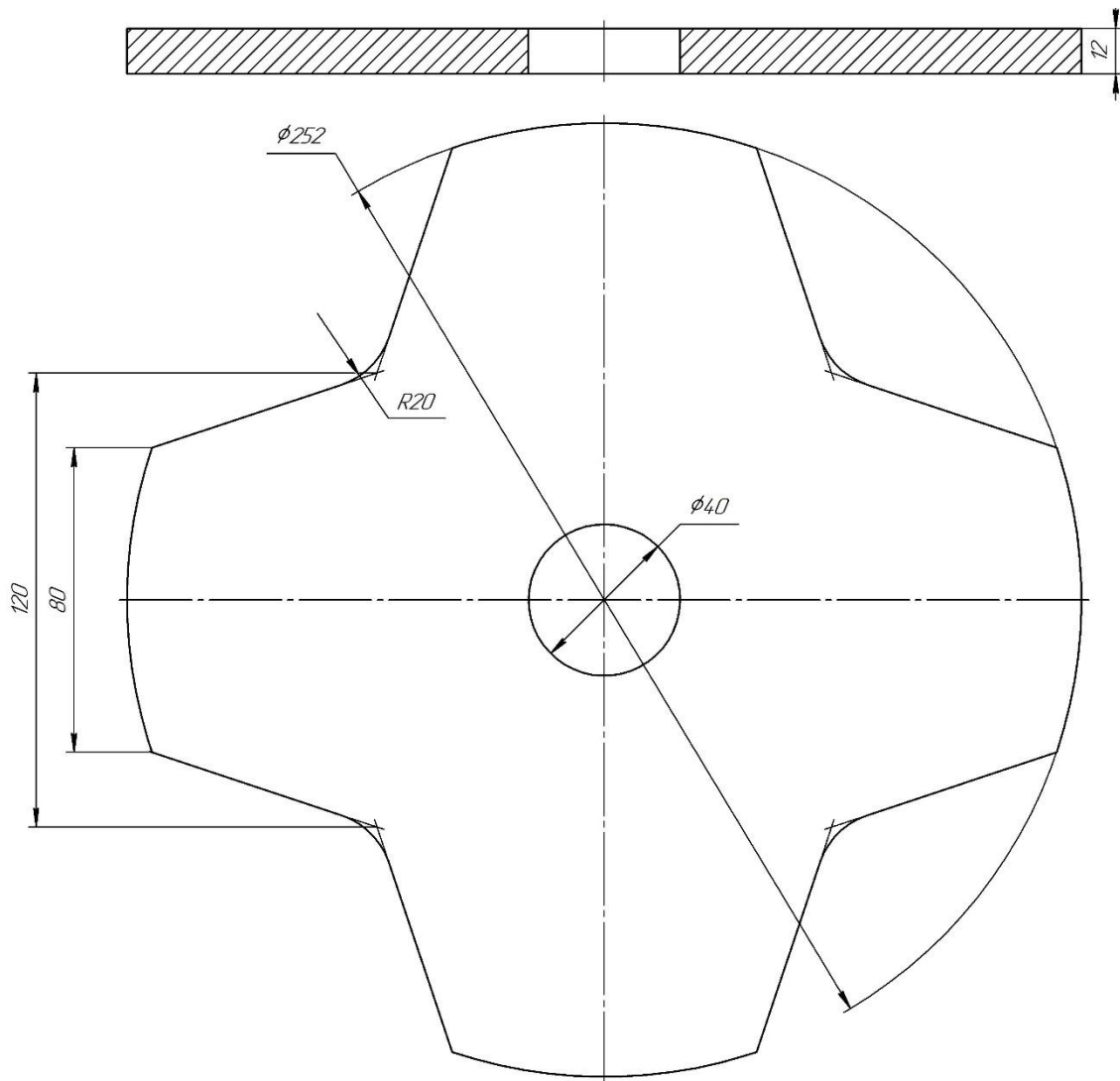
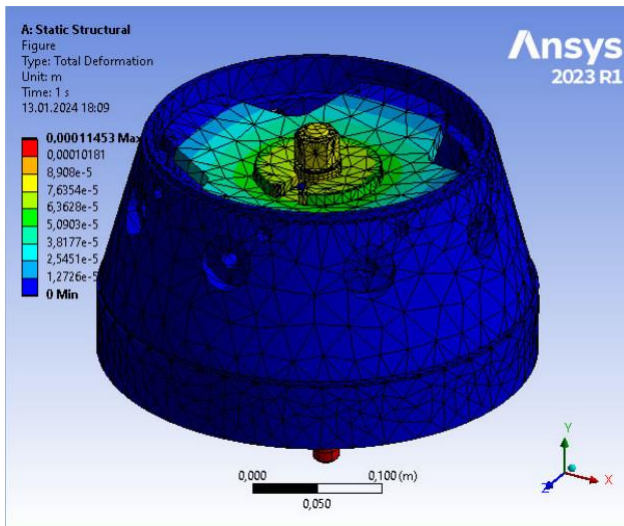
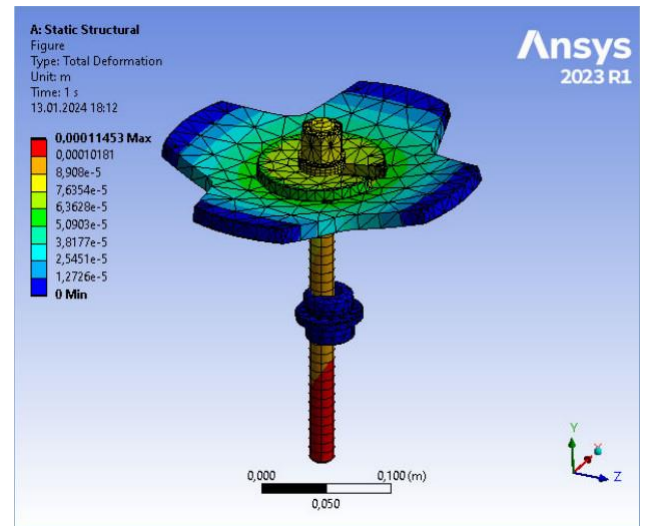


Рисунок 3.10 – Ескіз прихвата (виконання В)

Для порівняння характеристик напружено-деформованого стану системи «пристрій-заготовка» з урахуванням нової конфігурації прихвату було проведено розрахунок, за результатами якого одержані епюри «загальних переміщень», «пружних деформацій» та «внутрішніх напружень».

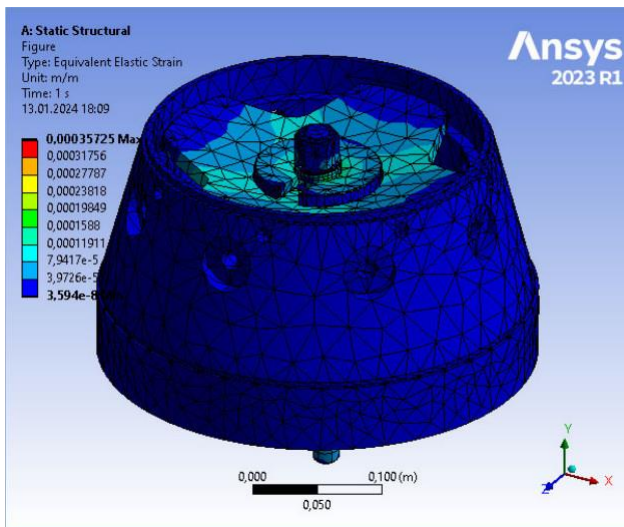


а

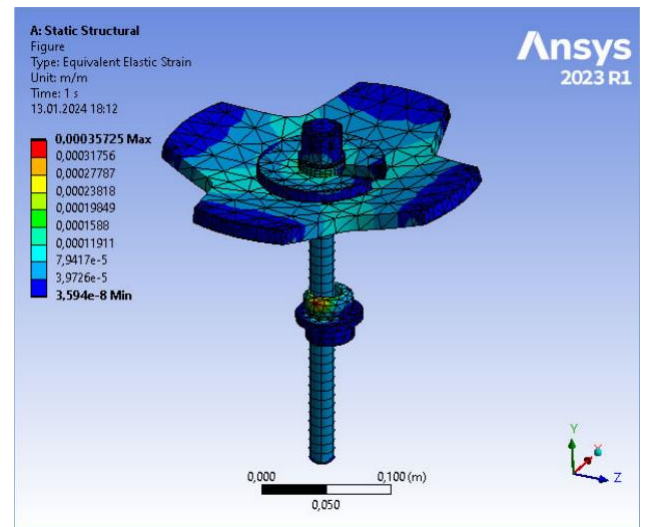


б

Рисунок 3.11 – Епюра «загальних переміщень» в системі «пристрій-заготовка»
(прихват – виконання В)

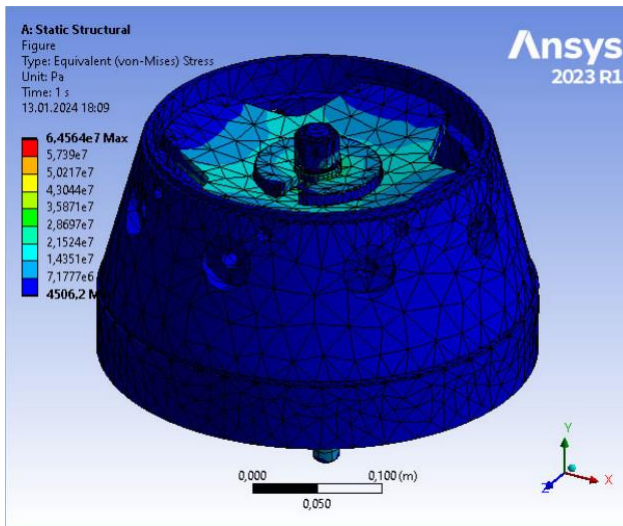


а

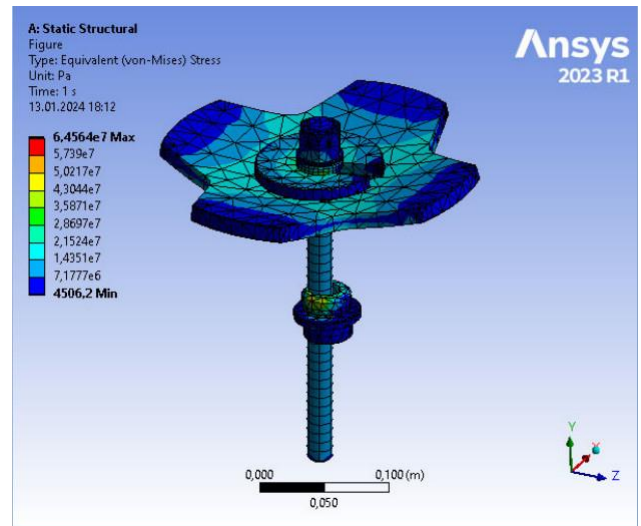


б

Рисунок 3.12 – Епюра «пружних деформацій» в системі «пристрій-заготовка»
(прихват – виконання В)



а



б

Рисунок 3.13 – Епюра «внутрішніх напружень» в системі «пристрій-заготовка» (прихват – виконання В)

Максимальний рівень загальних переміщень в системі становить 0,11453 мм (див. рис. 3.11).

Максимальний рівень пружних деформацій в системі становить 0,35725 мм (див. рис. 3.12).

Максимальний рівень внутрішніх напружень в системі становить 64,564 МПа (див. рис. 3.13).

Як видно з результатів розрахунку, характеристики напружено-деформованого стану системи «пристрій-заготовка» практично не змінились. Водночас конфігурація В прихвата має масу 3,603 кг, що на 0,813 кг менше порівняно з масою прихвата 4,416 кг за виконанням А.

3.3 Топологічна оптимізація конструкції верстатного пристрою

Рішення щодо прийнятих змін в конструкції прихвата за виконанням В порівняно з виконанням А є очевидними. Конфігурація В дозволяє більш-менш рівномірно розподілити навантаження на заготовку та сприяє зручному зніманню та установленню прихвата під час експлуатації верстатного пристрою.

Метод топологічної оптимізації пропонує неочевидні рішення щодо оптимізації конструкції виробу залежно від критерію оптимальності та інших граничних умов.

Алгоритм топологічної оптимізації конструкції прихвата в програмі Ansys Workbench було реалізовано в модулі Structural Optimization.

Згідно з алгоритмом топологічної оптимізації для попереднього аналізу напружено-деформованого стану прихвата в модуль Static Structural було імпортовано твердотільну модель прихвата за виконанням В (див. рис. 3.14).

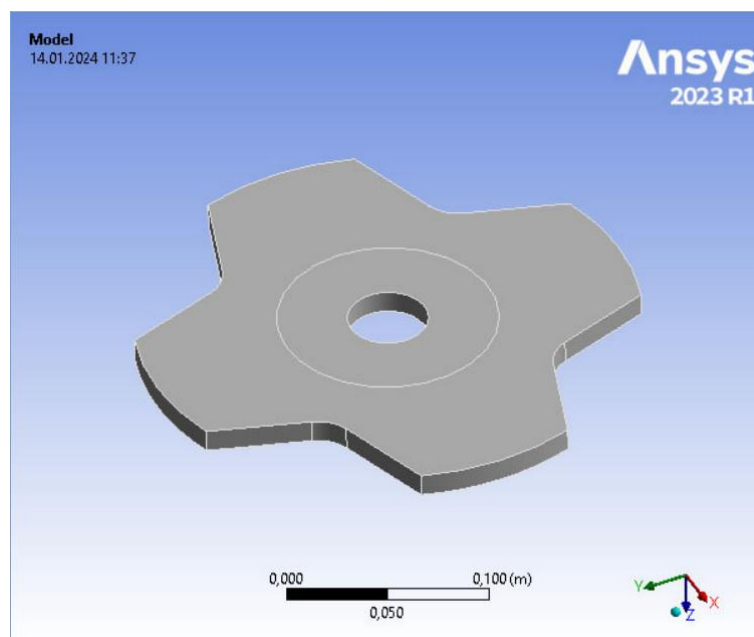


Рисунок 3.14 – Твердотільна модель прихвата (виконання В)

Для побудови скінченно-елементної моделі прихвата було в розділі Mesh задіяно інструмент Sizing, що дозволив задати розмір скінченного елемента – 0,003 мм для всього тіла (див. рис. 3.15).

Як і в попередніх розрахунках було задано матеріал виробу – середньовуглецева конструкційна сталь з межею міцності 460 МПа та межею текучості 250 МПа.

Були задані граничні умови:

- 1) «фіксована основа» (Fixed Support) – задано для периферійної частини основи прихвата;

- 2) «сила» (Force) – задано для центральної частини верхньої торця прихвата в розмірі 3500 Н, як сила, що діє на прихват через тягу та швидкознімну шайбу з боку механізованого приводу закріплення заготовки;

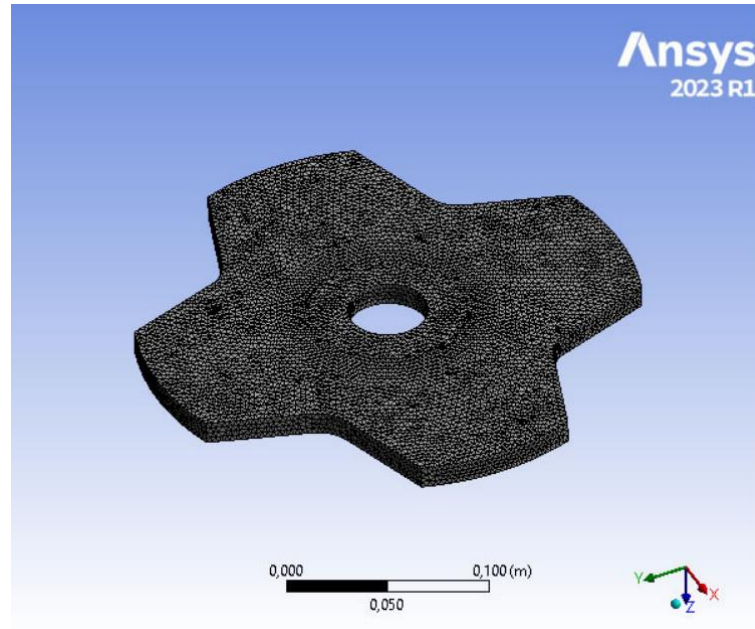


Рисунок 3.15 – Побудова скінченно-елементної моделі прихвата з використанням інструмента Sizing

В результаті розрахунку напружено-деформованого стану моделі були одержані такі результати (див. рис. 3.16, 3.17, 3.18).

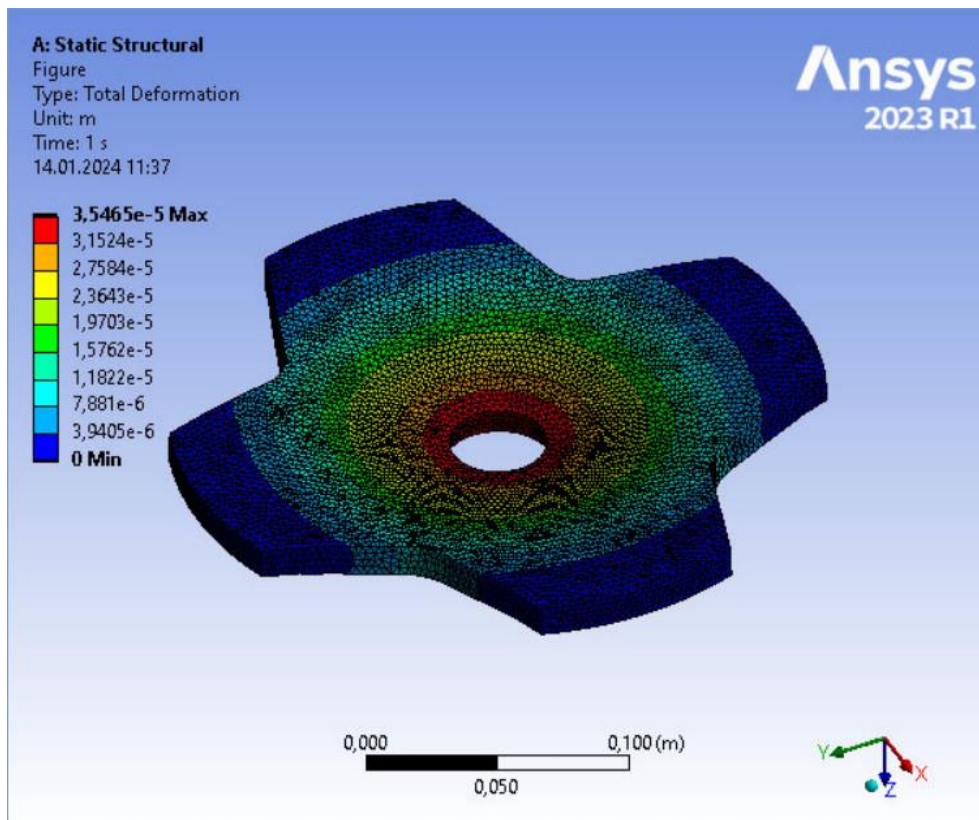


Рисунок 3.16 – Епюра «загальних переміщень»: прихват (виконання В)

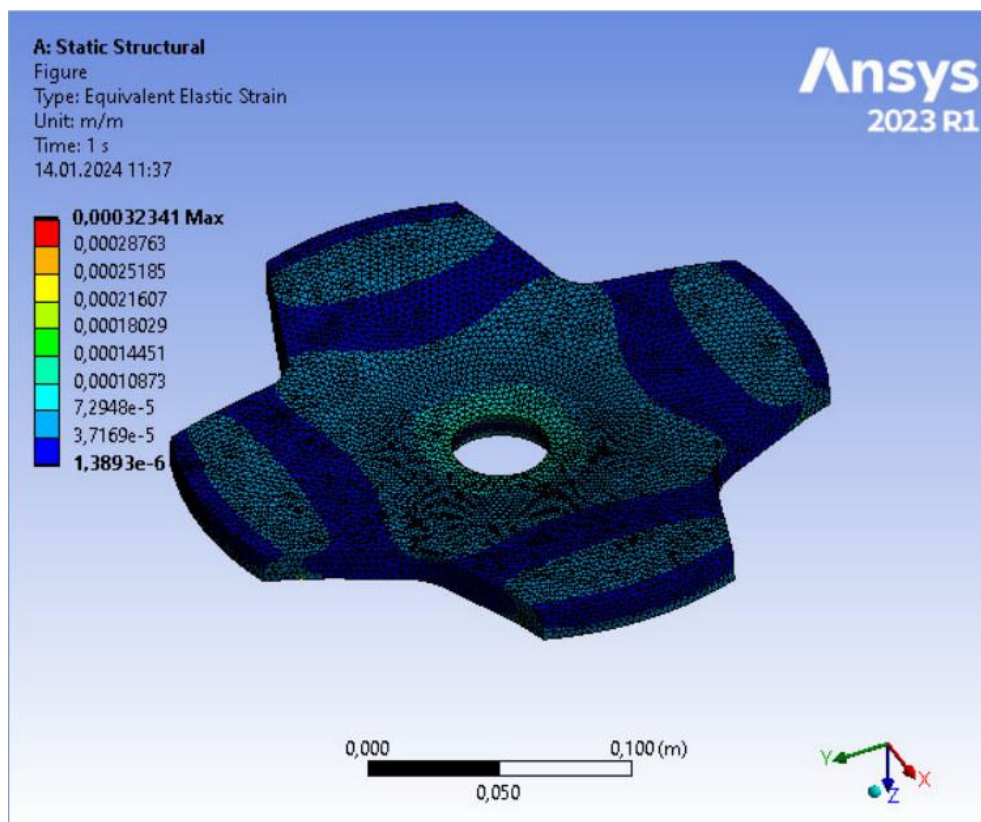


Рисунок 3.17 – Епюра «пружних деформацій»: прихват (виконання В)

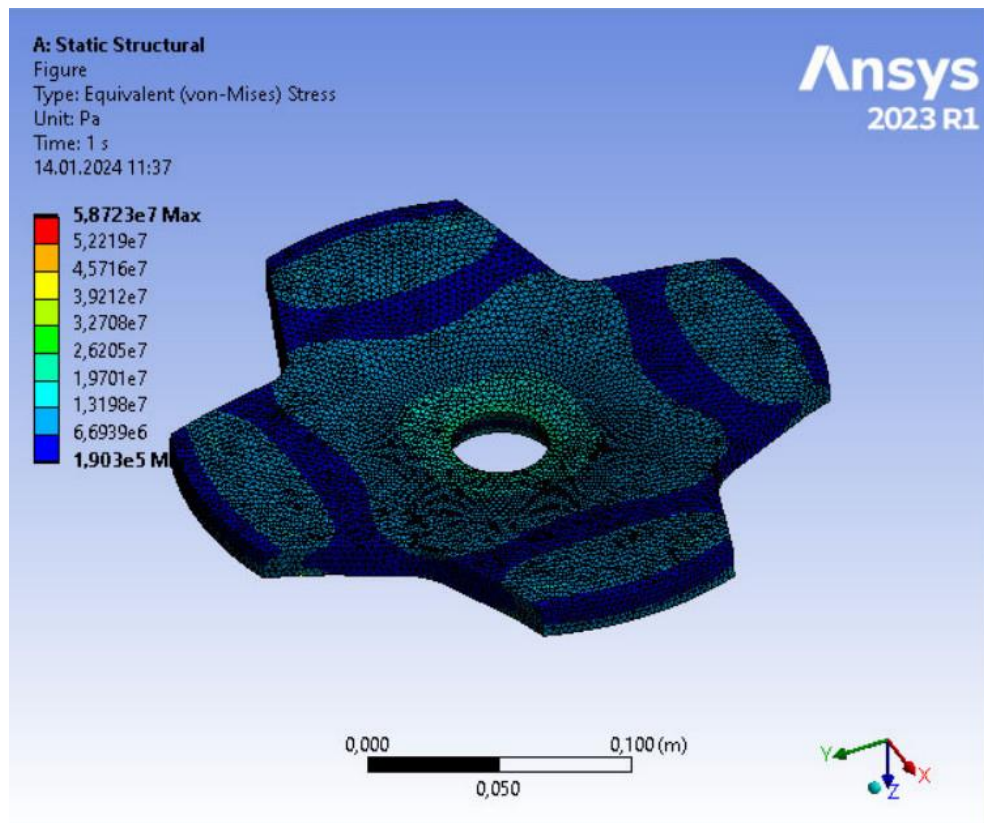


Рисунок 3.18 – Епюра «внутрішніх напружень»: прихват (виконання В)

За результатами розрахунку одержані такі характеристики:

- 1) максимальний рівень «загальних переміщень» – 0,035465 мм (для прихвата виконання А – 0,029024 мм);
- 2) максимальний рівень «пружних деформацій» – 0,32341 мм/м (для прихвата виконання А – 0,11539 мм/м);
- 3) максимальний рівень «внутрішніх напружень» – 58,723 МПа (для прихвата виконання А – 23,077 МПа).

Порівняння характеристик для конструкцій прихвата за виконанням А та В показало, що рівень загальних переміщень для виконання В став більшим в $\approx 1,2$ рази, рівень пружних деформацій став більшим в $\approx 2,8$ рази, рівень внутрішніх напружень стави більшим в $\approx 2,5$ рази. Водночас слід зазначити, що всі характеристики залишились в межах допустимих норм.

На наступному етапі реалізації алгоритму топологічної оптимізації було задано граничні умови: поверхні, що не підлягають коригуванню (Optimization Region). Як поверхні, що не підлягають коригуванню (Exclusion Region) були

вибрані такі, що контактують із швидкознімною шайбою та заготовкою (див. рис. 3.19).

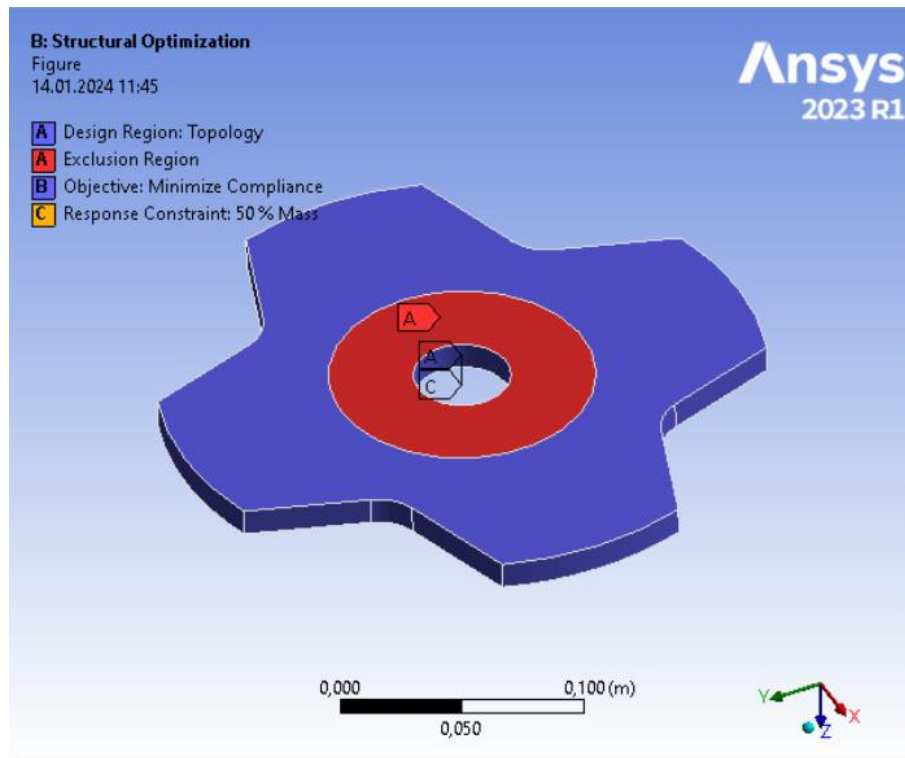
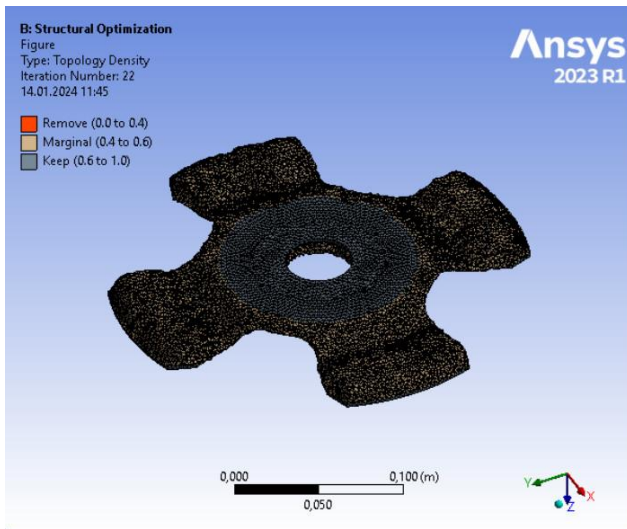


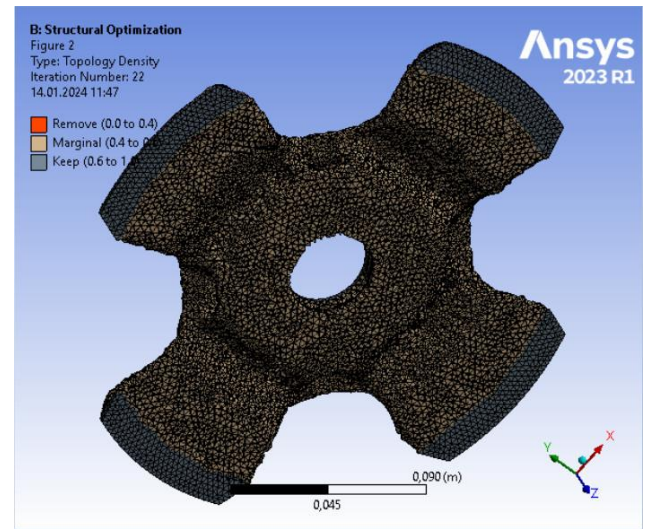
Рисунок 3.19 – Вибір поверхонь, що підлягають або не підлягають коригуванню

В параметрах модуля Structural Optimization вибираємо масу, яку потрібно «зберегти» (Type: Response Constraint, Response: Mass) – параметр Percent to Retain – 50 % (оптимізація буде спрямована на зменшення маси виробу до 50% від первинної величини).

В результаті розрахунку одержано епюру «псевдощільності» (Topology Density), яка відповідає за наявність або відсутність матеріалу в розрахунковій області, див. рис. 3.20 та 3.21 (Remove – матеріал рекомендовано вилучити, Marginal – матеріал рекомендовано вилучити або залишити на вибір, Keep – матеріал рекомендовано залишити).

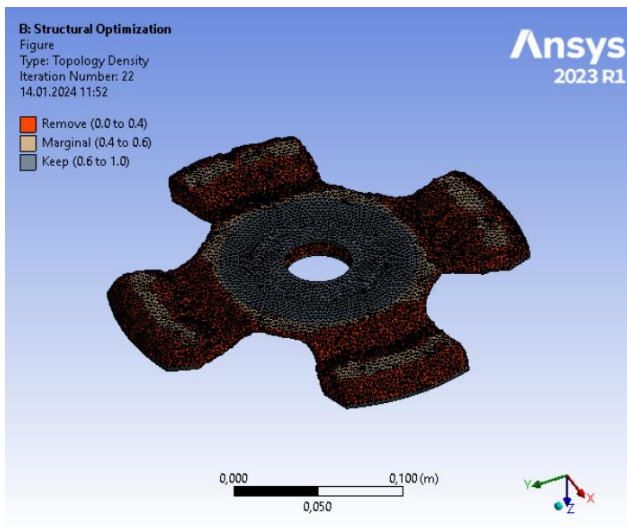


а

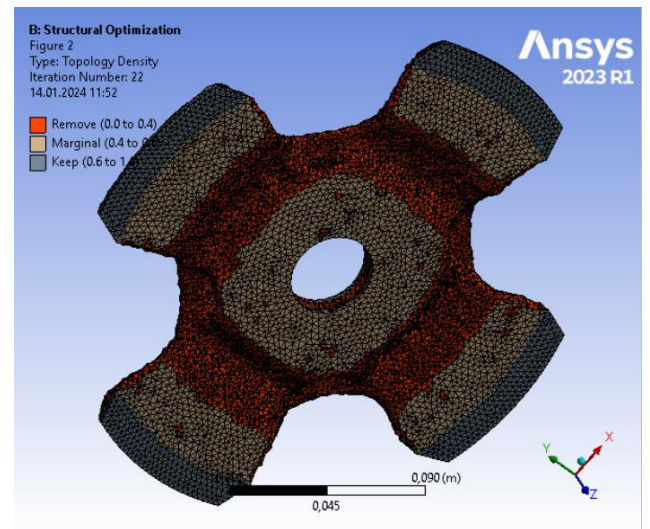


б

Рисунок 3.20 – Епюра псевдощільності: параметр Retained Threshold – 0,5



а



б

Рисунок 3.21 – Епюра псевдощільності: параметр Retained Threshold – 0,4

Коригування параметру Retained Threshold дозволяє побачити потенціальні шляхи оптимізації конфігурації виробу за прийнятих обмежень (див. рис. 3.21). На епюрі псевдощільності (вид збоку), див. рис. 3.22 видно конфігурацію перетину, до якого слід прагнути для забезпечення мінімально допустимої маси виробу.

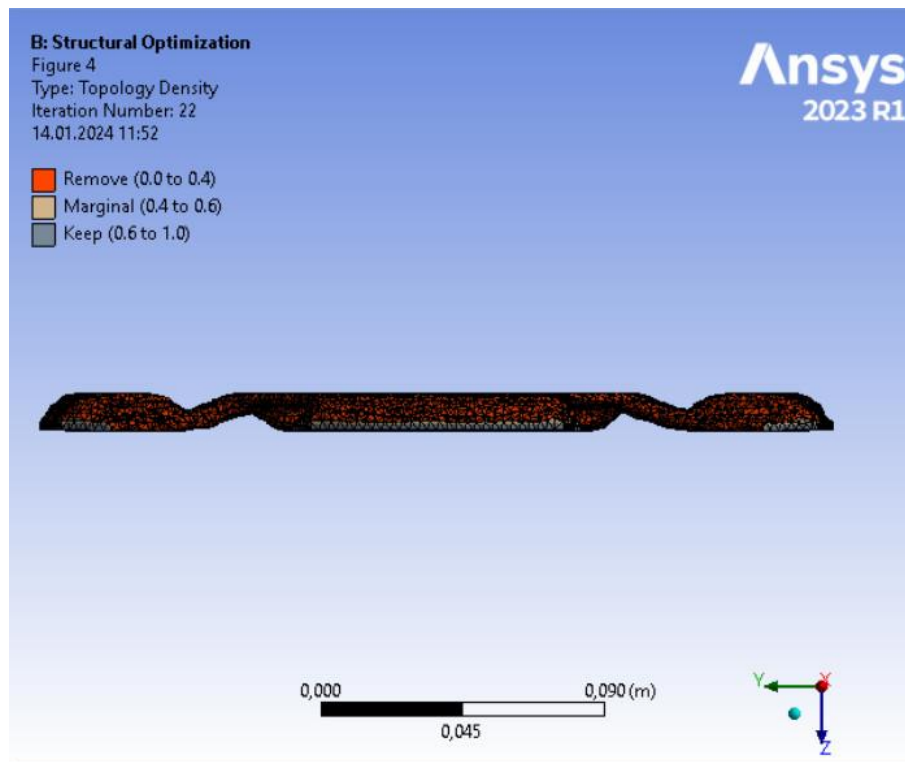


Рисунок 3.22 – Епюра псевдощільності виробу (вид збоку)

Модель виробу, одержана на основі епюри псевдощільності має бути адаптована до вимог існуючої виробничої технології. В результаті такої адаптації було спроектовано поперечний перетин прихвата за виконанням С (див. рис. 3.23).



Рисунок 3.23 – Ескіз поперечного перетину прихвата (виконання С)

З використанням пакету графічного дизайну SolidWorks було спроектовано твердотільну модель прихвата за виконанням С (див. рис. 3.24).

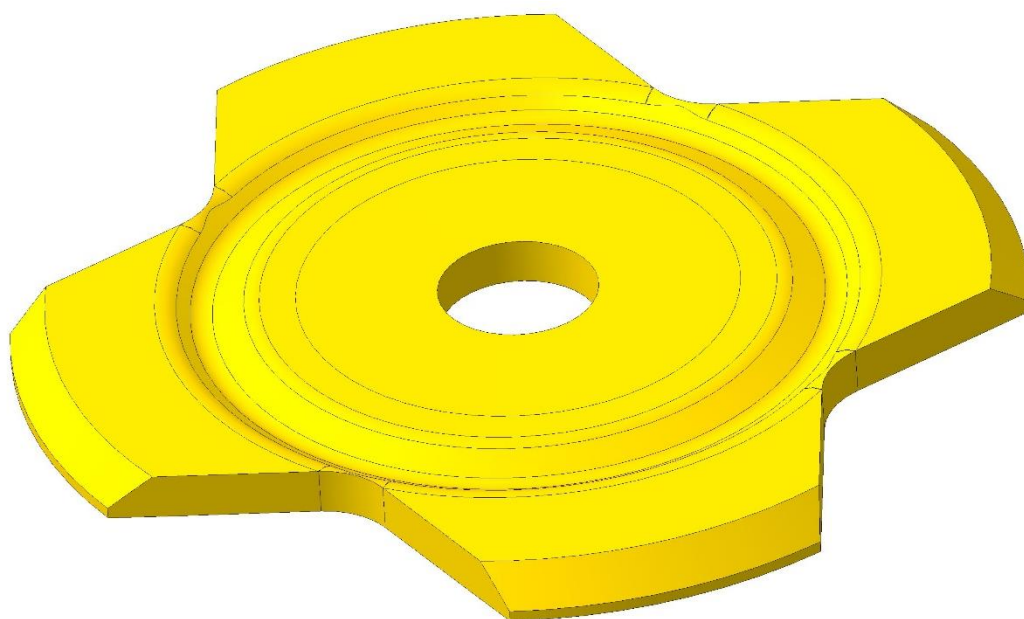


Рисунок 3.24 – Твердотільна модель прихвата (виконання С)

В результаті розрахунку скоригованої моделі прихвата були одержані такі епюри та характеристики його напружено-деформованого стану (див. рис. 3.25–3.27).

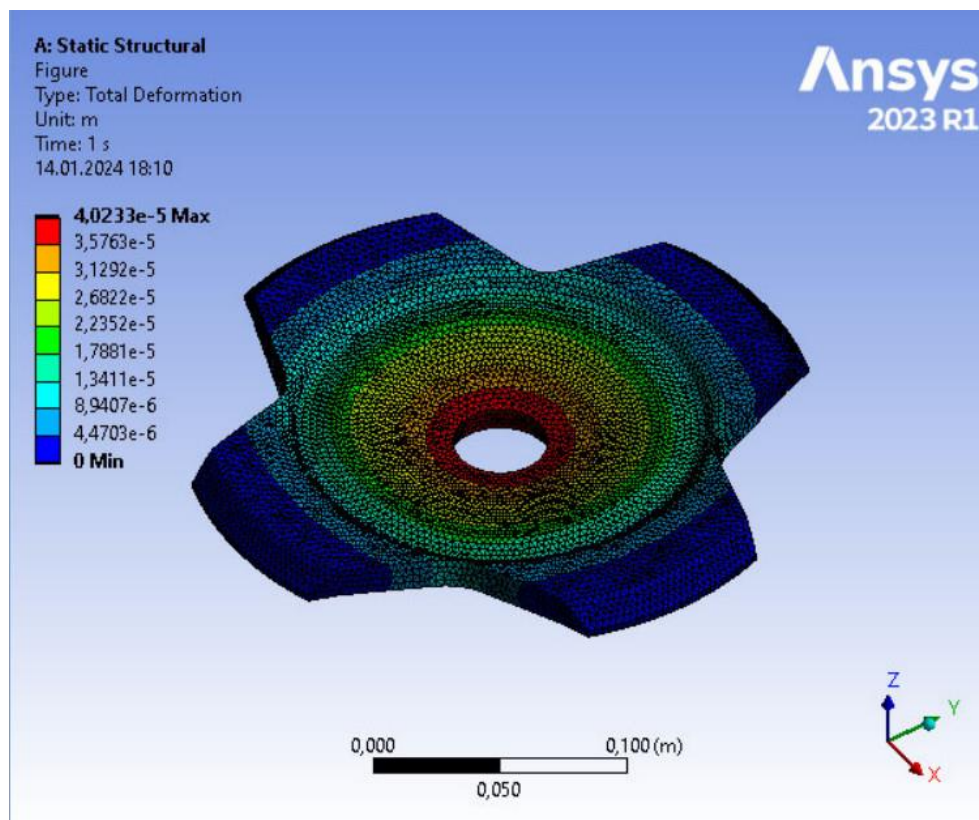


Рисунок 3.25 – Епюра «загальних переміщень»: прихват (виконання С)

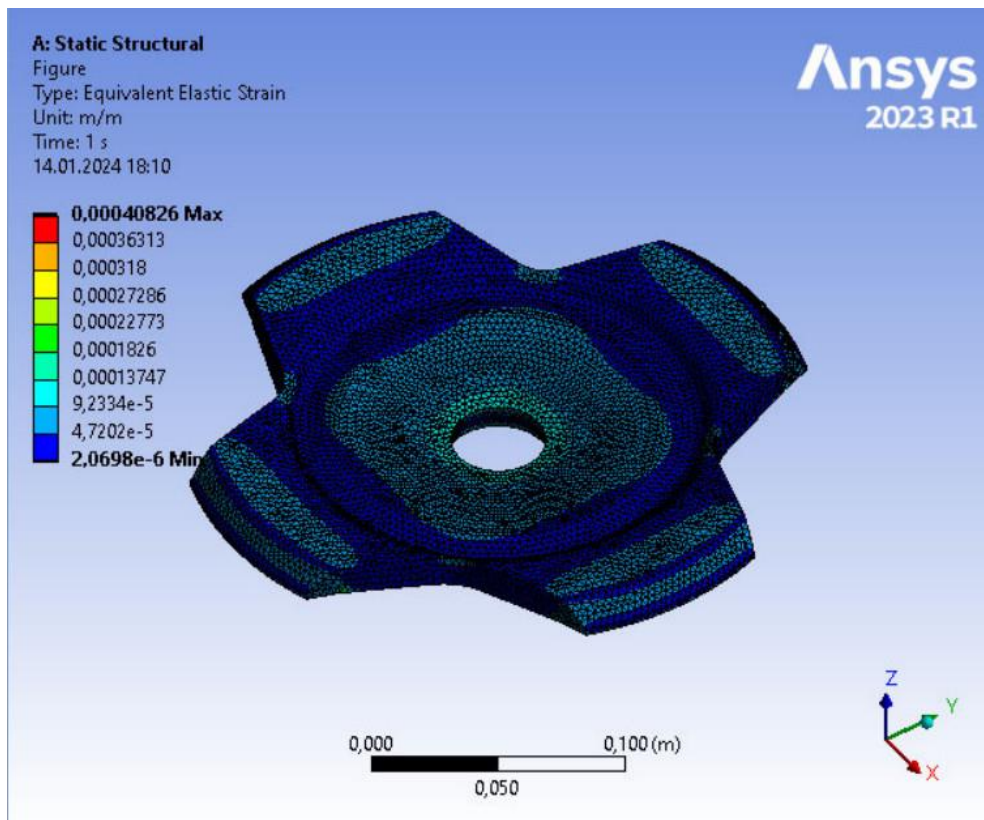


Рисунок 3.26 – Епюра «пружних деформацій»: прихват (виконання С)

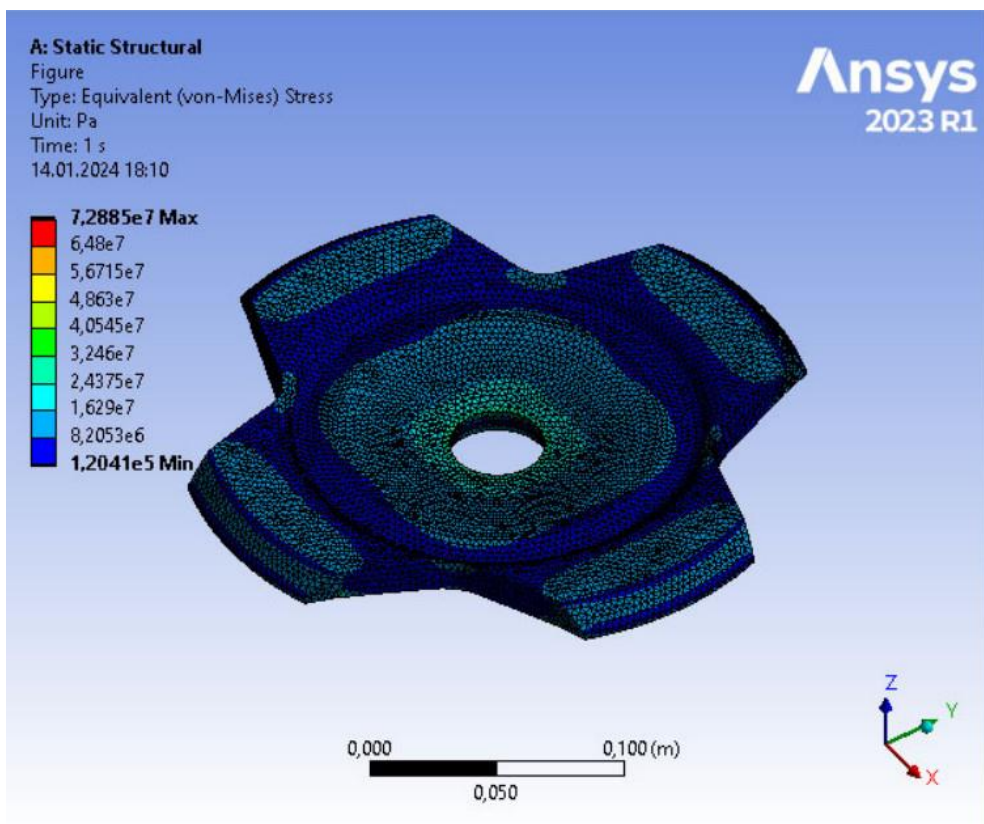


Рисунок 3.27 – Епюра «внутрішніх напружень»: прихват (виконання С)

Максимальний рівень «загальних переміщень» – 0,040233 мм;

Максимальний рівень «пружних деформацій» – 0,40826 мм/м;

Максимальний рівень «внутрішніх напружень» – 72,885 МПа.

Водночас маса прихвата склала 3,106 кг.

Для наочного порівняння характеристик напружено-деформованого стану конструкції прихвата було складено таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняння характеристик напружено-деформованого стану конструкції прихвата

	Виконання конструкції		
	А	В	С
Загальні переміщення, м	0,029024	0,035465	0,040233
Пружні деформації, мм/м	0,11539	0,32341	0,40826
Внутрішні напруження, МПа	23,077	58,723	72,885
Маса виробу, кг	4,416	3,603	3,106

3.4 Модальний аналіз конструкції верстатного пристрою

Для попередження умов виникнення резонансу під час експлуатації системи «пристрій-заготовка» з урахуванням особливостей конструкції прихвата за виконанням С в модулі Modal програми Ansys Workbench було проведено модальний аналіз досліджуваної системи (див. рис. 3.28), за результатами якого побудовані епюри власних форми коливань (див. рис. 3.29–3.31).

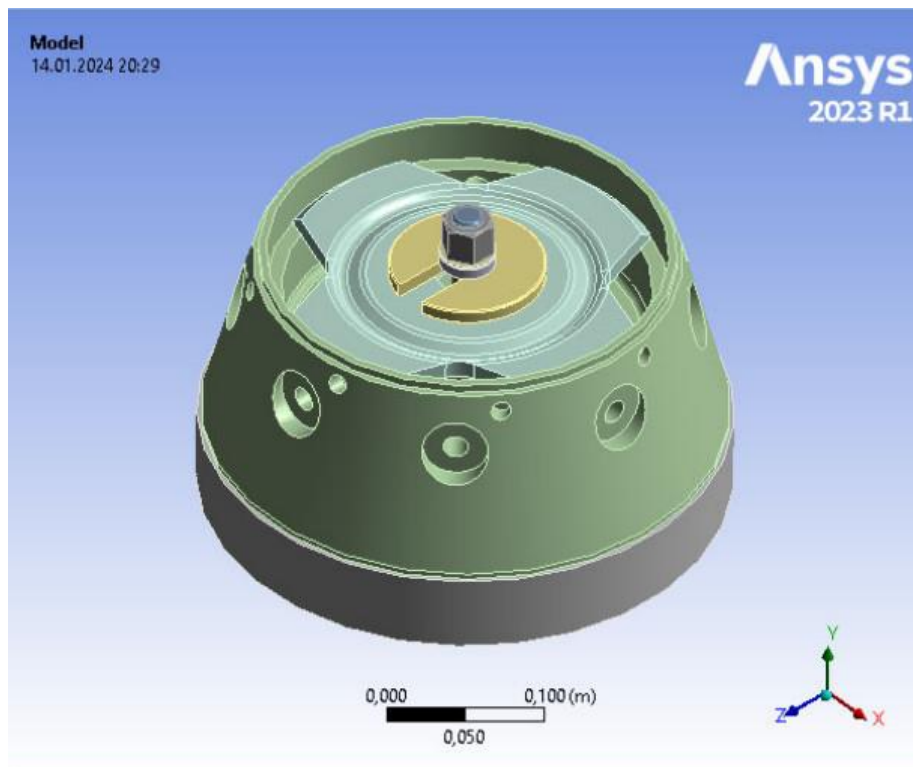


Рисунок 3.28 – Модель досліджуваної системи «пристрій-заготовка»

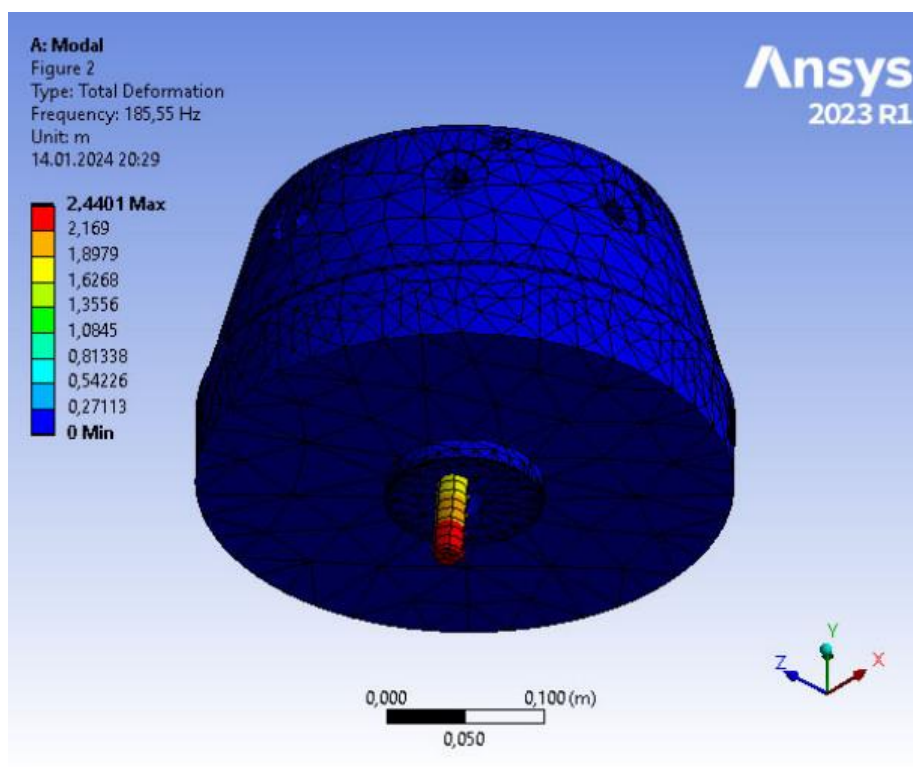


Рисунок 3.29 – Перша форма власних коливань досліджуваної системи

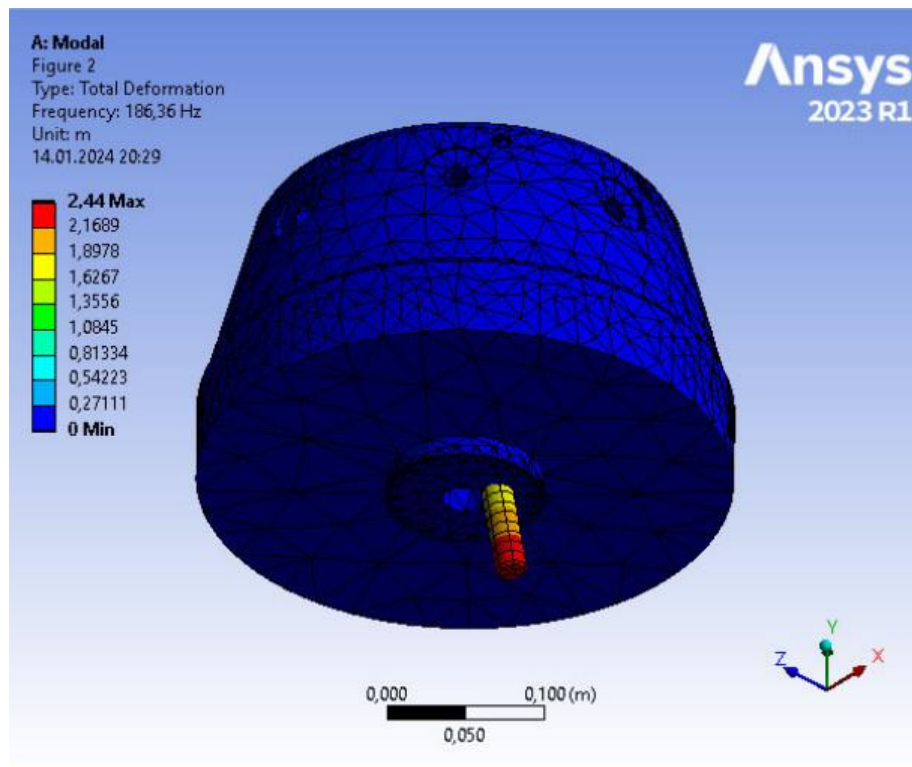


Рисунок 3.30 – Перша форма власних коливань досліджуваної системи

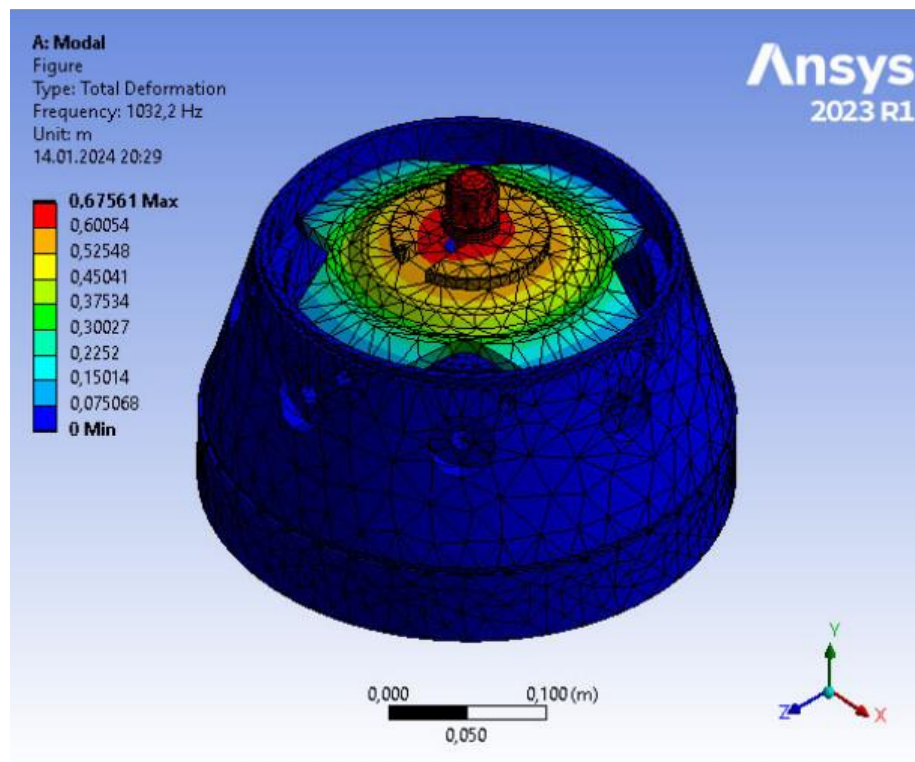


Рисунок 3.31 – Перша форма власних коливань досліджуваної системи

Аналіз епюр показав, що першій формі власних коливань відповідає частота 185,55 Гц, другій – 186,36 Гц, третій – 1032,2 Гц. Відомо, що найбільш небезпечними з токи зори можливості виникнення резонансу є перші форми коливань, оскільки існує велика кількість потенційних джерел вимушених коливань, що зазвичай виробляють низькочастотні коливання. Четвертій, п'ятій, шостій та наступним формам коливань за визначенням будуть відповідати більші за величиною частоти. Аналіз структури горизонтально-розточувальної операції, на якій використовується пропонована конструкція верстатного пристрою, показав, що для першого переходу (фрезерування) характерна частота процесу різання $1150 \cdot 4 / 60 = 76,7$ Гц, для другого переходу (свердління) – $1200 \cdot 2 / 60 = 40$ Гц, третього переходу (зенкерування) – $320 \cdot 3 / 60 = 16$ Гц. В наведених розрахунках перше число – частота обертання осьового інструменту (шпинделя верстата), друге число – кількість різальних зубів (для фрези – 4, для свердла – 2, для зенкера – 3), третє число – до зволяє перевести одиниці вимірювання часу з «хвилини» в «секунди» ($1 \text{ Гц} = \text{с}^{-1}$).

Порівняння частот перших власних форм коливань досліджуваної системи з частотами процесу різання показав їх неспівпадіння. Отже, виникнення явища резонансу під час оброблення заготовки в пропонованому пристрою за прийнятих режимів різання неможливе. Для гарантованого забезпечення технічних вимог, рекомендованих для оброблюваних поверхонь заготовки робочим кресленням виробу слід уникати частот процесу різання, що відповідають 185–186 Гц.

3.5 Висновок

1. Аналіз напружено-деформованого стану системи «пристрій-заготовка» показав, що всі статичні характеристики пропонованої в розділі 2 конструкції верстатного пристрою знаходяться в межах допустимих норм.

2. Для зменшення матеріаломісткості конструкції верстатного пристрою було запропоновано альтернативну конструкцію прихвата (виконання В), що дозволило зменшити його масу з 4,416 кг (виконання А) до 3,603 кг за допустимого збільшення величин статичних характеристик. Застосування методу топологічної оптимізації дозволило запропонувати нову конструкцію прихвата (виконання С) з масою 3,105 кг за допустимого збільшення величин статичних характеристик. Отже в складальному кресленні верстатного пристрою пропонується використовувати конструкцію прихвата за виконанням С.

3. За результатами проведення модального дослідження системи «пристрій-заготовка» встановлено, що частоти перших трьох власних форм коливань системи не співпадають з частотами процесів різання, характерних для горизонтально-розточувальної операції. Отже, виникнення явища резонансу є неможливим за прийнятих умов.

ВИСНОВКИ

1. В роботі проаналізовано існуючий технологічний процес виготовлення деталі «диск 4.2303.100 СК», сформульовано основні недоліки базової технології та пропозиції щодо її усунення.

2. Відповідно до зауважень, сформульованих за результатами аналізу базової технології виготовлення диска 4.2303.100 СК, було складено маршрут перспективного технологічного процесу виготовлення деталі, що відрізняється повсюдним застосуванням верстатів та обробних центрів з ЧПК та використанням верстатних пристроїв з механізованими приводом закріплення заготовки.

3. Для підвищення продуктивності та стабілізації параметрів точності оброблюваних поверхонь заготовки на комплексній операції з ЧПК було спроектовано верстатний пристрій з пневматичним приводом закріплення заготовки. Розроблені специфікація та складальне креслення верстатного пристрою.

4. Для перевірки правильності прийнятих проектних рішень пропонувану конструкцію верстатного пристрою в системі з заготовкою було досліджено методами статичного та динамічного аналізу. Аналіз системи «пристрій-заготовка» статичними методами показав, що всі характеристики напружено-деформованого стану пропонуваної конструкції верстатного пристрою знаходяться в межах допустимих норм.

5. Застосування методу топологічної оптимізації за мінімальною масою виробу, як критерієм оптимізації, дозволило спроектувати нову конструкцію прихвата (як компонента верстатного пристрою), що характеризується меншою матеріаломісткістю.

6. Аналіз системи «пристрій-заготовка» динамічними методами показав також показав надійність її роботи в умовах динамічних навантажень.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Бойко Ю. І. Технологія машинобудування. Курсове проектування : навч. посіб. / Ю. І. Бойко, О. А. Литвиненко. Київ: НУХТ, 2018. 195 с.
2. 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.
3. 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.
4. ДСТУ 8981:2020 Виливки з металів та сплавів. Допуски розмірів, маси й припуски на механічне оброблення.
5. EC-630 HAAS [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.haascnc.com/machines/horizontal-mills/ec-series/models/ec-630.html>. – Заголовок з екрану.
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. Calabrese, M., Primo, T. Del Prete, A. Optimization of Machining Fixture for Aeronautical Thin-walled Components. Procedia CIRP, Volume 60, 2017, 32–37.
8. Boyle, I., Rong, Y., Brown, D.C.: A review and analysis of current computer-aided fixture design approaches. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 27 (2011), 1–12.

9. Wang, H., Rong, Y., Li, H., Shaun, P.: Computer aided fixture design: Recent research and trends. *Computer Aided Design*, 42 (2010), 1085–1094.
10. Zhou, Y., Li, Y., Wang, W.: A feature-based fixture design methodology for the manufacturing of aircraft structural parts. *Robotics and Computer – Integrated Manufacturing*, 27 (2011), 986–993.
11. Moroni, G., Petro, S., Polini, W.: Robust design of fixture configuration. 24th CIRP Design Conference, *Procedia CIRP*, 21 (2014), 189–194.
12. Li, B., Melkote, S.N.: Improved workpiece location accuracy through fixture layout optimization. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 39 (1999), 871–883.
13. Raghu, A., Melkote, S.N.: Analysis of the effects of fixture clamping sequence on part location errors. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 44 (2004), 373–382.
14. Vasundara, M., Padmanaban, K.P., Sabareeswaran, M., RajGanesh, M.: Machining fixture layout design for milling operation using FEA, ANN and RSM. *Procedia Engineering* 38 (2012), 1693–1703.
15. Wan, X.J., Zhang, Y.: A novel approach to fixture layout optimization on maximizing dynamic machinability. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 70 (2013), 32–44.
16. Ratchev, S., Phuah, K., Liu, S.: FEA-based methodology for the prediction of part-fixture behaviour and its applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 191 (2007), 260–264.
17. 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*.
18. Siebenaler, S.P., Melkote, S.N.: Prediction of workpiece deformation in a fixture system using the finite element method. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46 (2006), 51–58.
19. 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.

20. 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.

21. Zherong Pan, Xifeng Gao, Kui Wu, First-order topology optimization via inexact Finite Element Analysis, *Computer-Aided Design*, 157 (2023).

22. Amir M. Mirzendehtdel, Morad Behandish, Saigopal Nelaturi, Topology Optimization for Manufacturing with Accessible Support Structures, *Computer-Aided Design*, 142 (2022).

23. Amir M. Mirzendehtdel, Morad Behandish, Saigopal Nelaturi. Topology optimization with accessibility constraint for multi-axis machining. *Computer-Aided Design*, 122 (2020).

24. Calabrese, M., Primo, T. Del Prete, A. Optimization of Machining Fixture for Aeronautical Thin-walled Components. *Procedia CIRP*, Volume 60, 2017, 32–37.

25. Möhring, H.-Ch., Wiederkehr, P. Intelligent Fixtures for High Performance Machining. *Procedia CIRP*, Volume 46, 2016, 383–390.

26. 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.

27. Метод скінченних елементів. Вікіпедія [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Метод_скінченних_елементів. – Заголовок з екрану.

28. Ansys Workbench. Вікіпедія [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.ansys.com/products/ansys-workbench>. – Заголовок з екрану.