

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Сумський державний університет

Факультет технічних систем та енергоефективних технологій

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра технології машинобудування, верстатів та інструментів

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Віталій ІВАНОВ

(підпис)

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

«магістр»

(бакалавр/магістр)

зі спеціальності

131 «Прикладна механіка»

(код та назва)

освітньо-професійної

програми

«Технології машинобудування»

(освітньо-професійної/освітньо-наукової)

(назва програми)

на тему:

Удосконалення технологічного процесу виготовлення корпусу

підшипників 1.1630-20.20-02 шляхом структурно-параметричної

оптимізації верстатного пристрою для базування та закріплення

заготовки на комплексній з ЧПК операції

Здобувача (ки) групи

ТМ.м-31

(шифр групи)

Невальонний Олександр Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

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

Олександр НЕВАЛЬОННИЙ

(підпис)

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Керівники

доцент, канд. техн. наук, доцент Артем ЄВТУХОВ

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

(підпис)

менеджер глобального розвитку

WAGO GmbH & Co. KG Дмитро Адаменко

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

(підпис)

Нормоконтролер

доцент, канд. техн. наук, доцент Іван ДЕГТЯРЬОВ

(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 на виготовлення деталі	14
1.3 Характеристика типу виробництва та форми організації робіт	16
1.4 Аналіз технологічності конструкції деталі.....	17
1.5 Аналіз існуючого маршруту оброблення заготовки.....	22
1.6 Висновок	28
Розділ 2 Розроблення перспективного технологічного процесу виготовлення деталі.....	29
2.2 Обґрунтування вибору способу одержання заготовки.....	33
2.3 Визначення припусків, розмірів та технічних вимог на виготовлення заготовки	35
2.3.1 Визначення припусків та розмірів заготовки статистичним методом ...	35
2.3.2 Визначення операційних припусків та розмірів на оброблення поверхні обертання	37
2.3.3 Розмірний аналіз технологічного процесу	39
2.4 Аналіз комплексної на обробному центрі з ЧПК операції 050	46
2.4.1 Аналіз схеми базування та закріплення заготовки	46
2.4.2 Обґрунтування вибору металорізального устаткування.....	51
2.4.3 Обґрунтування вибору технологічної оснастки.....	52
2.4.4 Визначення режимів різання та технічних норм часу.....	53
2.5 Проєктування верстатного пристрою	56
2.6 Висновок	64
Розділ 3 Дослідження щодо структурно-параметричної оптимізації конструкції верстатного пристрою.....	65
3.1 Мета та методика дослідження.....	65
3.2 Статичний аналіз конструкції системи «заготовка-пристрій»	67

3.3 Топологічна оптимізація компонентів системи верстатного пристрою ...	76
3.4 Висновок.....	84
Висновки	85
Перелік джерел посилання	86

ВСТУП

Актуальність роботи. Корпус підшипників 1.1630-20.20-02 входить до складу підвіски ротора центрифуги типу ФПІ-1251Л-08, яка набула широкого поширення в хімічній та цукровій промисловості. Отже підвищення ефективності технологічного процесу виготовлення корпусу підшипників та центрифуги загалом є актуальним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема роботи пов'язана з науковим напрямком досліджень кафедри ТМВІ СумДУ щодо підвищення ефективності процесів механічного оброблення заготовок деталей.

Мета і задачі роботи. Метою роботи є підвищення ефективності технологічного процесу виготовлення «корпусу підшипників» шляхом структурно-параметричної оптимізації конструкції верстатного пристрою для базування та закріплення заготовки на комплексній операції з ЧПК.

Задачі:

- 1) проаналізувати базовий технологічний процес виготовлення «корпусу підшипників»;
- 2) розробити перспективний технологічний процес виготовлення «корпусу підшипників»;
- 3) спроектувати верстатний пристрій для базування та закріплення заготовки «корпусу підшипників» на комплексній з ЧПК операції;
- 4) виконати дослідження запропонованої конструкції верстатного пристрою методами статичного аналізу та топологічної оптимізації. Запропонувати рішення щодо вдосконалення спроектованої конструкції верстатного пристрою для забезпечення експлуатаційної надійності останнього.

Об'єкт дослідження – технологічний процес виготовлення «корпусу підшипників», конструкція верстатного пристрою для базування та закріплення заготовки на комплексній з ЧПК операції.

Предмет дослідження – технологічний процес виготовлення «корпусу підшипників», структура та параметри верстатного пристрою для базування та закріплення заготовки на комплексній з ЧПК операції.

Методи дослідження. Геометричну модель запропонованої конструкції верстатного пристрою розроблено програмі графічного дизайну SolidWorks. Дослідження конструкції верстатного пристрою з метою перевірки прийнятих проектних рішень методами статичного аналізу та топологічної оптимізації виконано в системі інженерного аналізу ANSYS Workbench.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що на основі теоретичних та експериментальних досліджень оптимізовано конструкцію самоцентрувальних лещат з механізованим приводом закріплення заготовки як верстатного пристрою для установлення заготовки «корпусу підшипників» на комплексній з ЧПК операції та сформульовано рекомендації щодо вдосконалення його конструкції для забезпечення надійної роботи пристрою.

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 проаналізовано маршрут базового технологічного процесу виготовлення «корпусу підшипників», виявлені недоліки та запропоновані рішення, спрямовані на підвищення його ефективності. Спроектовано конструкцію самоцентрувальних лещат для установлення заготовки на комплексній з ЧПК операції. Виконано дослідження

конструкції верстатного пристрою методом статичного аналізу та топологічної оптимізації. Сформульовані висновки та рекомендації щодо вдосконалення конструкції пропонованого верстатного пристрою, що були реалізовані в складальному кресленні останнього.

Структура та обсяг роботи. Робота складається зі вступу, 3-х розділів, загальних висновків, переліку посилань з 20 джерел, 88 сторінок основного тексту, 33 рисунків та 11 таблиць.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ІСНУЮЧОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ

1.1 Аналіз службового призначення машини, вузла, деталі

Корпус підшипників 1.1630-20.20-02, на якому зосереджено увагу в цій роботі, є частиною шарнірної опори центрифуги ФПІ-1251Л-08, підвісної машини з вертикальною компоновкою, яка характеризується високою швидкістю роботи та повністю автоматизованим управлінням. Вона належить до категорії машин з інерційним способом вивантаження осаду [1]. Основною перевагою центрифуг безперервної дії з таким вивантаженням є відсутність пристроїв, які рухають осад уздовж ротора. Вивантаження відбувається за рахунок відцентрових сил інерції, що перевищують сили тертя, які утримують осад на ситі або направляючих елементах.

Основною конструктивною особливістю підвісних центрифуг (див. рис. 1.1) є вертикальне розміщення осі ротора 1. Вал підвішений своїм верхнім кінцем у кульовій опорі, яка знаходиться значно вище від центру обертання системи. Кульова опора, що також називається головкою приводу центрифуги, являє собою систему підшипників кочення, встановлених у стакан, який вільно спирається на сферичну поверхню корпусу приводу. Відхилення валу обмежується гумовим амортизатором, який знижує динамічне навантаження на підшипники у випадку дисбалансу. Корпус головки приводу фіксується болтами на поздовжніх швелерах 5, що спираються на дві стійки 2. Система змащення підшипників – консистентна. Привід центрифуги – від фланцевого електродвигуна 4, з'єднаного з валом центрифуги 3 спеціальною пружною муфтою.

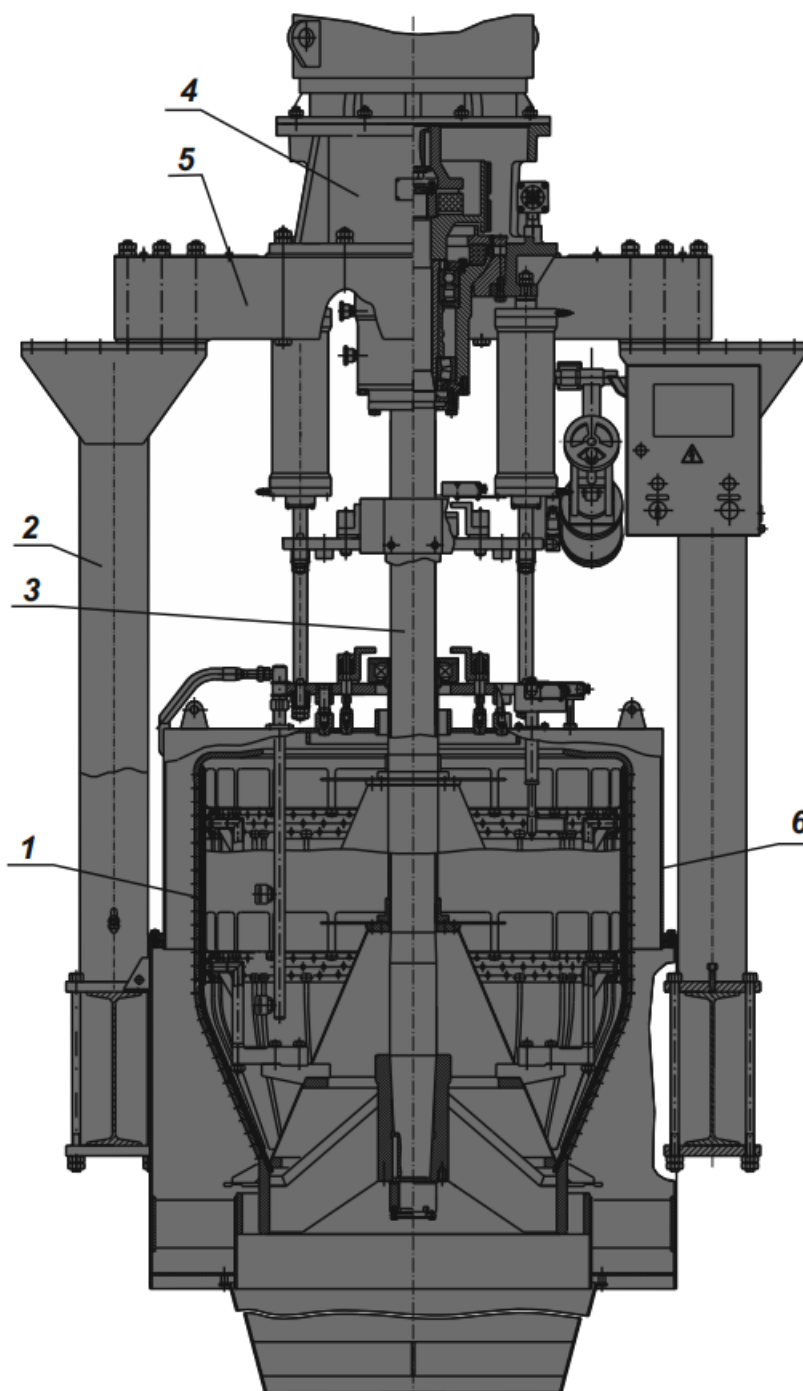


Рисунок 1.1 – Ескіз підвісної центрифуги типу ФПІ

В таблиці 1.1 наведені основні технічні характеристики центрифуги.

Одним з основних вузлів приводу центрифуги є вузол підвіски валу з ротором центрифуги, зокрема, кульова (шарнірна) опора підвіски.

Корпус підшипників 1.1630-20.20-02 верхньою кульовою поверхнею спирається у вкладиші корпусу приводу і фіксується від обертання спеціальним штифтом. Між корпусом приводу і корпусом підшипників встановлений

гумовий амортизатор, який затискається гайкою за допомогою конічної втулки, що ковзає по шпонці. У корпусі підшипників вал центрифуги встановлений через втулку підшипників на двох радіальних і одному упорному підшипниках кочення. З боку гальмівного шківів корпус закритий кришкою, а зазор між кришкою і маточиною шківів з нарізкою, зворотною до напрямку обертання вала, запобігає витоку масла з корпусу.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики центрифуги ФПІ-1251Л-08

Найменування характеристики	Величина
Ротор	
Внутрішній діаметр, мм	1250
Висота, мм	1000
Кут нахилу твірної конуса, град.	34
Найбільша частота обертання на хвилину	1760
Найбільший фактор розділення	2283
Ємність, дм ³	700
Найбільше завантаження, кг	1000
Робочий тиск, МПа	
В пневмосистемі	0,8
В гідросистемі	0,4
В системі пропарювання	0,2
Розрахункова продуктивність за кінцевим продуктом, т/год	7,5
Коефіцієнт динамічності	4

На рисунках 1.2 та 1.3 наведені ескізи корпусу підшипників 1.1630-20.20-02. Деталь можна віднести до класу східчастих втулок з D_{\max} фланця 470С11 і D_{\min} зовнішньої циліндричної поверхні 325, довжиною $L = 400$ мм, D_{\min} внутрішнім східчастого отвору 250Н7, D_{\max} поверхні отвору 430 та мінімальною товщиною стінки – 20 мм. Маса деталі становить 126 кг, матеріал деталі – сталь 25Л ГОСТ 977-88.

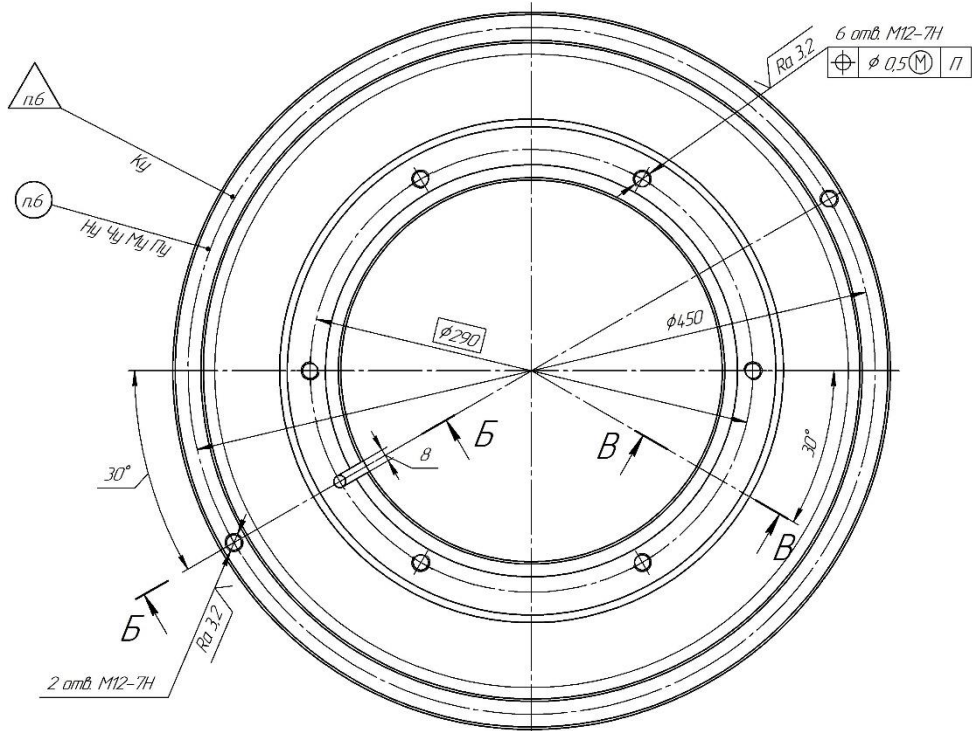
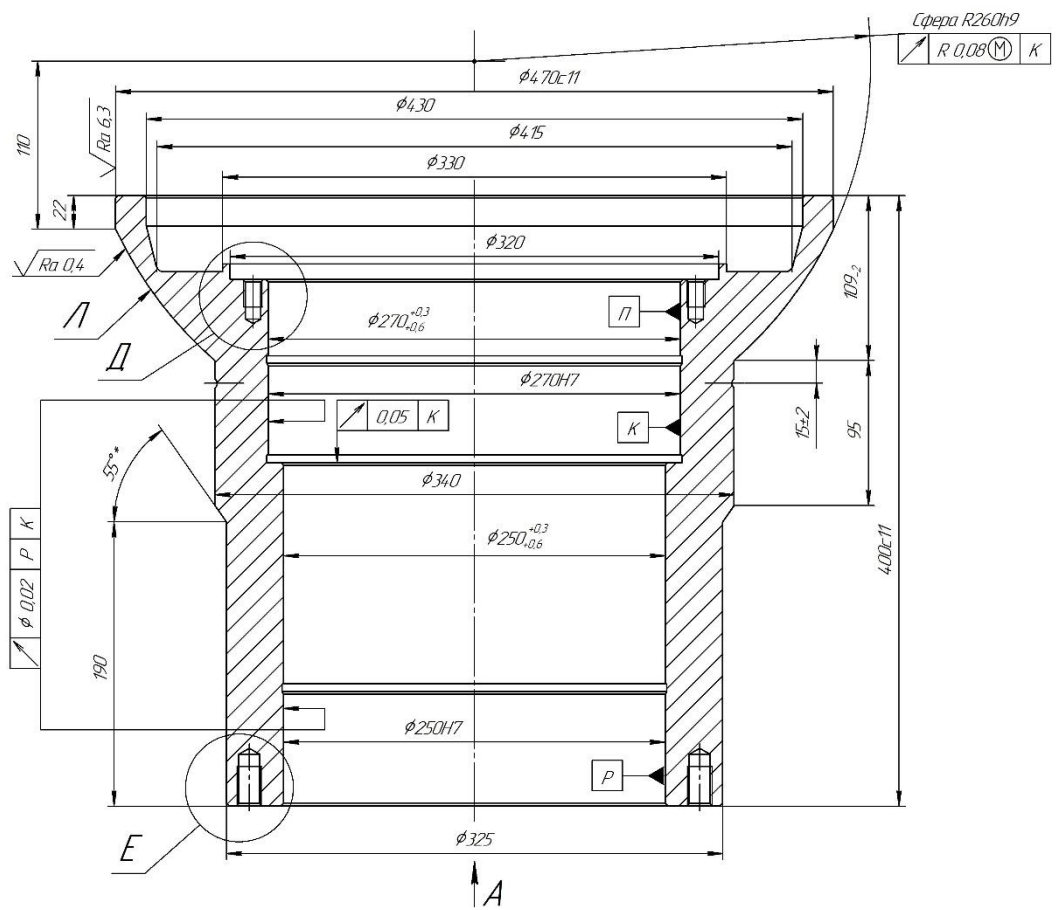


Рисунок 1.2 – Ескіз деталі

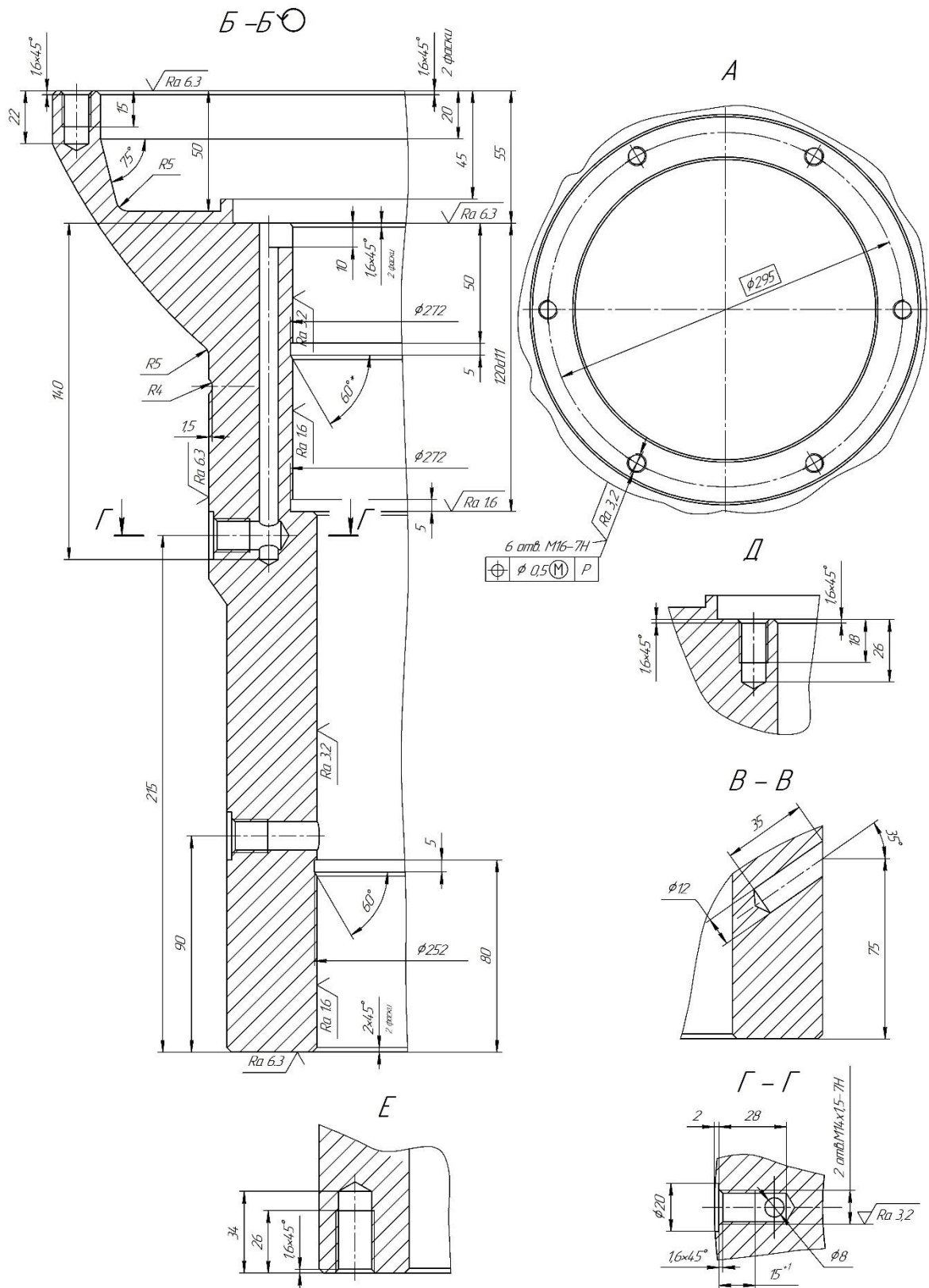


Рисунок 1.3 – Ескіз деталі

Основним призначенням корпусу підшипників є монтаж втулки підшипників разом із валом ротора в підшипниках кочення всередині корпусу

підвіски приводу центрифуги. Ключовою конструктивною базою корпусу підшипників є сферична поверхня R260h9, за допомогою якої деталь спирається на вкладиш, розташований у корпусі підвіски. Ця сферична поверхня корпусу забезпечує подвійну опорну та центрувальну базу, що обмежує три ступені свободи деталі, запобігаючи поступальним переміщенням уздовж осей X, Y та Z. Водночас залишаються можливими обертальні рухи корпусу підшипників навколо тих самих осей.

Додатковими базовими поверхнями корпусу підшипників є ті, через які до нього приєднуються інші деталі у складі вузла. Зокрема, втулка підшипників з валом ротора центрифуги кріпиться в корпусі підшипників за допомогою двох радіальних підшипників кочення, що встановлюються по внутрішніх циліндричних поверхнях діаметром $\varnothing 250H7$ і $\varnothing 270H7$. Ці поверхні забезпечують підшипникам кочення дві опори. Для додаткового фіксування, яке обмежує ще три ступені свободи (загалом п'ять), використовуються стопорні кільця, які вставляються у спеціальні канавки корпусу підшипників з розмірами $\varnothing 272 \times 5$ і $\varnothing 252 \times 5$.

У верхній частині внутрішнього торця корпусу підшипників виконано кільцеве заглиблення діаметрами 430, 415 і 330 мм, з нахилом 75° та радіусом R5, в яке встановлюється гумовий амортизатор. Він притискається до торця дна цього заглиблення за допомогою спеціальної кришки. Кришка кріпиться до зовнішнього торця корпусу підшипників по діаметру 470C11 через два кріпильні отвори M12-7H, розташовані по колу $\varnothing 450$. Окрім основної функції, ці отвори також виконують роль технологічних елементів – вони використовуються для встановлення спеціальних гвинтів знімача під час демонтажу деталей вузла підвіски центрифуги або для кріплення двох рим-болтів при підйомі вузла підвіски.

Щоб запобігти небажаному обертанню корпусу підшипників навколо вертикальної осі, на його зовнішній поверхні $\varnothing 325$ на відстані 75 мм від нижнього торця під кутом 35° виконано отвір $\varnothing 12$, у який встановлюється спеціальний штифт.

Внутрішні порожнини корпусу підшипників зверху закриваються кришкою, що кріпиться до торцевої поверхні $\varnothing 320$ за допомогою шести отворів М12-7Н. На нижньому торці корпусу, також через шість кріпильних отворів М16-7Н, монтується спеціальний маслоуловлювач, який запобігає витоку мастила, що подається до підшипників кочення у вузлі підвіски.

Для подачі мастила до двох верхніх підшипників вузла на зовнішній циліндричній поверхні корпусу підшипників $\varnothing 340$ виконано радіальний отвір М14×1,5-7Н для встановлення маслянки. Через цю маслянку мастило подається у верхню порожнину деталі по поздовжньому отвору $\varnothing 8$ та поперечному пазу розміром 8×10 мм. У нижній частині корпусу підшипників на $\varnothing 325$ розміщено аналогічний отвір М14×1,5-7Н для маслянки, що забезпечує подачу мастила в нижню порожнину вузла до радіального підшипника. Для надійного прилягання торців маслянок до зовнішніх циліндричних поверхонь корпусу підшипників навколо отворів М14×1,5-7Н виконано циліндричні заглиблення $\varnothing 20 \times 2$ з плоским дном.

Для захисту сферичної поверхні R260h9 від пилу використовується гумове кільце ущільнювача, що встановлюється по зовнішній поверхні $\varnothing 340$ кільцевої канавки з R4 та глибиною 1,5 мм.

Інші поверхні «корпусу підшипників» є вільними і формують її загальну конфігурацію та об'єм.

Корпус підшипників 1.1630-20.20-02 працює в умовах значних статичних і циклічних навантажень, витримуючи підвішений обертовий ротор центрифуги з максимальною частотою обертання до 1760 об/хв. Маса обертових елементів може досягати 1100 кг. Деталь розміщена в захищеному середовищі всередині корпусу вузла підвіски приводу центрифуги і забезпечується примусовим мастилом. Інші частини вузла підвіски змащуються солідолом УС-3 відповідно до ГОСТ 1033-79. Під час експлуатації деталь зазнає короткочасних вібрацій, що надходять від ротора і валу центрифуги. Шарнірна підвіска корпусу підшипників допускає відхилення системи від вертикалі та забезпечує самоцентрування обертових мас.

1.2 Аналіз технічних вимог на виготовлення деталі

Корпус підшипників 1.1630-20.20-02 виконує роль шарнірної опори (підвіски) та виконує роль корпусу підшипників для встановлення вала ротора центрифуги у вертикальному положенні, що дає можливість компенсувати поперечні навантаження та вібрації.

Корпус підшипників як деталь типу східчаста втулка з відношенням $L/D < 1$ має фланцеву частину з боку верхнього торця $\varnothing 470$, шириною 109 мм і нижнім сферичним торцем з R260h9. Сферична поверхня є ключовим елементом корпусу, яка багато в чому визначає головну функцію виробу – компенсація поперечних навантажень та вібрацій. Зовнішній діаметр «корпусу» в середній частині має величину $\varnothing 340/\varnothing 325$, внутрішній діаметр – $\varnothing 270/\varnothing 250$, довжину – 400 мм, мінімальну товщину стінки – 35 мм. Отже конструкція деталі має доволі велику поперечну жорсткість.

Вимоги щодо матеріалу деталі (сталь 25Л ГОСТ 977-88), способу одержання заготовки – литтям згідно з II групою (точність вилівка 13-0-0-13 відповідно до ДСТУ 8981:2020), технічні вимоги відповідно до ТУ 26-12768-88, задані обґрунтовано та відповідно до функціонального призначення та умов експлуатації виробу (деталь працює в складних умовах статичних та динамічних навантажень, визначає працездатність та експлуатаційну надійність вузла підвіски ротора та центрифуги загалом). Фізико-механічні властивості сталі 25Л: межа текучості σ_T – 240 МПа, тимчасовий опір розриванню σ_B – 450 МПа, відносне подовження δ_5 – 19 %, контролюються згідно з II групою виливків. Окрім того, контролю піддають хімічний склад та зовнішній вигляд виливків. Для підвищення міцності втомленості та зменшенню рівня внутрішніх напружень виливок піддають термічному, що в результаті сприяє підвищенню експлуатаційної надійності виробу.

Робоче креслення деталі регламентує точність розмірів, взаємного розміщення та форми поверхонь, їх шорсткість. Основна конструкторська база деталі, сфера R260h9, відповідає 9-му квалітету точності та має шорсткість

0,4 мкм за критерієм Ra. На додаток вона має бути притерта спільно з деталлю 1.1630-20.10-04 оскільки ці деталі працюють як шарнірна пара. Згідно з умовами експлуатації вся підвісна система повинна мати можливість відхилитися від вертикальної осі під час експлуатації, отже обґрунтовано задано вимогу щодо площі прилягання поверхонь парних деталей – 95%. Така вимога дозволяє запобігти інтенсивному зношенню сполучених поверхонь деталей. З цих міркувань регламентовано і допуск радіального биття сферичної поверхні 0,08 мм щодо бази $\varnothing 270H7$.

Поверхні $\varnothing 270H7$ та $\varnothing 250H7$ корпусу підшипників виконують роль допоміжних конструкторських баз. Саме за ними встановлюють зовнішні кільця підшипників. Квалітет точності поверхонь корпусу за IT7 повністю відповідає функціональному призначенню цих поверхонь, як і шорсткість оброблення поверхонь – 1,6 мкм Ra. З подібних міркувань задані доволі жорсткі допуски на радіальне биття цих поверхонь заданий у межах 0,02 мм (5-й ступінь точності), допуск на торцеве биття поверхні $\varnothing 250/\varnothing 270$ деталі – 0,05 мм (7-й ступінь точності).

Циліндричні поверхні отворів $\varnothing 270_{+0,3}^{+0,6}$ та $\varnothing 250_{+0,3}^{+0,6}$ виконують за 10–12-м квалітетами, шорсткість поверхонь – 3,2 мкм Ra: така точність та шорсткість є цілком достатніми для встановлення по них дистанційних втулок під зовнішні кільця підшипників.

Цілком обґрунтованими є точність та шорсткість отворів (IT14, шорсткість 12,5 мкм Ra) для підведення до підшипників мастила у виробі виконано глибокий отвір $\varnothing 8 \times 140$ та паз 8×10 мм.

Розміри кільцевого торцевого поглиблення 430/415/330 регламентовані 14-м квалітетом точності та шорсткістю 12,5 мкм Ra, що цілком достатнім для установлення гумового амортизатора.

Вимоги щодо точності 2-х різьбових отворів M14 \times 1,5-7H також задані обґрунтовано: дрібний крок 1,5 мм сприяє підвищенню надійності і герметичності з'єднання, оскільки ці отвори призначені для установлення маслянок.

Точність шести різьбових отворів M12-7H задана за 7-м квалітетом що є нормальним для заданих умов. За допомогою цих отворів відбувається фіксація кришки, що закриває порожнину вузла від попадання пилу та інших забруднень.

Аналогічну точність мають шість різьбових отворів M16-7H, розташованих у нижньому торці корпусу підшипників, за якими фіксується маслоуловлювач.

Точність інших, вільних, поверхонь деталі задано за 14-м квалітетом, здебільшого вони мають шорсткість 6,3–12,5 мкм Ra.

Водночас точність габаритного осьового розміру 400с11 задано за 11-м квалітетом, що обумовлено необхідністю формування лінійного розмірного ланцюга деталі та складального вузла загалом, до складу якого входять підшипники, дистанційні втулки та кришки кульового шарніра (підвіски) ротора центрифуги.

Висновок: робоче креслення деталі дає повне уявлення про конфігурацію та технічні вимоги для виготовлення виробу з повною відповідністю чинним стандартам та нормативній документації.

1.3 Характеристика типу виробництва та форми організації робіт

Як відомо [2], тип виробництва визначають за величиною коефіцієнта закріплення операцій $K_{з.о}$, який дорівнює відношенню всіх різних операцій, виконуваних підрозділом впродовж місяця, до кількості робочих місць. Величину $K_{з.о}$ визначимо за аналітичною методикою [3] з використанням розрахункового шаблону MS Excel. В якості первинних даних для розрахунку $K_{з.о}$ візьмемо штучний час $T_{шт}$ за операціями відповідно до базового технологічного процесу виготовлення деталі та річний обсяг випуску деталей $N = 400$ шт.

В результаті маємо $K_{з.о} = 14,36$, що відповідає середньо-серійному типу виробництва.

Характерною ознакою серійного виробництва є те, що вироби «запускаються» в обробку одночасно партіями (однойменними та однотипними

за конструкцією та типорозмірами виробами). Для прийнятих умов величина партії запуску дорівнює 38 шт. за періоду запуску 24 доби (один раз на місяць).

В серійному виробництві застосовують як універсальне так і спеціалізоване металорізальне устаткування, верстати з ЧПК, обробні центри з ЧПК. Використовується як універсальна так і спеціалізована оснастка та інструмент. Для установки заготовок на верстатах використовують верстатні пристрої з механізованими приводами закріплення заготовок. Це в свою чергу підвищує ефективність використання устаткування з ЧПК. Середня кваліфікація робітників 3-5 розряди.

Для серійного типу виробництва характерною є групова форма організації робіт, яка ґрунтується на формуванні предметно-замкнутих ділянок, спрямованих на оброблення деталей, що мають близькі конструкторські та технологічні ознаки.

1.4 Аналіз технологічності конструкції деталі

Як відомо [3], технологічність конструкції деталі визначається можливостями її виготовлення з мінімальною собівартістю та максимальною продуктивністю за умов дотримання точності та якості поверхонь, властивостей матеріалу, безпеки та екологічності виробництва, згідно з робочим кресленням деталі.

Аналіз технологічності конструкції деталі за якісними ознаками. Як було сказано вище, матеріалом деталі є ливарна сталь 25Л. Цей матеріал можна вважати технологічним, оскільки сталь 25Л є поширеною та відносно дешевою маркою, з гарними властивостями щодо можливості оброблення різанням. Для підвищення рівня втомної міцності та покращання експлуатаційних характеристик матеріал заготовки після ливарної операції потрібно піддавати термічному обробленню. Це потрібно для зменшення внутрішніх напружень, що зокрема виникають під час охолодження виливка. Для оброблення сталі 25Л різанням згідно з рекомендаціями теорії різання застосовують двокарбідні тверді

сплави марок Т5К10 (для попереднього оброблення) та Т15К6 (для чистового оброблення).

Згідно з робочим кресленням деталі визначено спосіб одержання заготовки – виливок II групи литтям у піщано-глинисті форми. Точність виливка має відповідати параметрам 13-0-0-13 ДСТУ 8981:2020. Такий метод одержання виливка та її точність в умовах дрібносерійного виробництва є поширеним та прийнятним з точки зору собівартості. Отже, цей фактор можна вважати технологічним.

Водночас слід згадати про відносно великі габарити та масу (до 270 кг) деталі. Цей фактор не можна вважати технологічним, оскільки велика маса виробу зокрема вимагає застосування додаткових підйомно-транспортних засобів з механізованими приводами і т. ін.

Конфігурацію деталі можна віднести до технологічних факторів, оскільки вона в основному представлена сукупністю простих за формою циліндричних поверхонь діаметри яких зменшуються з боку одного торця до іншого. Це стосується як зовнішніх так і внутрішніх поверхонь. Єдиною нетехнологічною ознакою в сенсі конфігурації є сферична поверхня R260h9, яка виконує роль шарніра. Співвідношення довжини та діаметра деталі, мінімальна товщина стінок, визначають доволі високу жорсткість виробу, що дозволяє обробляти його поверхні із застосуванням форсованих режимів різання.

В конструкції виробу через фаски та галтелі відсутні різкі переходи між сходинками, що сприяє зниженню концентрації напружень та підвищенню експлуатаційної надійності виробу та є технологічним фактором.

Проставлення розмірів деталі є комбінованим (використовуються послідовні та паралельні ланцюги), це дозволяє поєднувати технологічні та вимірювальні (конструкторські) бази, що у свою чергу сприяє усуненню похибок базування при обробленні заготовок на верстатах та сприяє дотриманню точності відповідно до вимог робочого креслення деталі.

До нетехнологічних елементів насамперед слід віднести сферичну поверхню R260h9, яка окрім специфічної геометрії характеризується відносно

високою якістю (R_a 0,4 мкм) та точністю взаємного розміщення (допуск радіального биття 0,08 мм). Оброблення такої поверхні потребує використання додаткових фінішних етапів оброблення із застосуванням специфічного устаткування та оснастки. Також слід пам'ятати, що фінішні методи оброблення на кшталт притирання мають низьку продуктивність.

Нетехнологічним також є досить великий перепад діаметрів фланцевої та основної частин деталі ($\varnothing 420/\varnothing 340$). Довготривале переналагодження верстатного пристрою під час переустановлення заготовки з одного діаметру закріплення на інший в рамках однієї операції ускладнює її обробку та знижує продуктивність виробництва.

До нетехнологічних конструктивних елементів деталі також слід віднести велику кількість глухих різьбових отворів. Їх оброблення потребує використання або декількох етапів оброблення (свердління, зенкування, нарізання різі) або оброблення за один прохід отвору та фаски комбінованим свердлом з подальшим нарізанням різі. Для нарізання різі машинним мітчиком для запобігання його поламки потрібно використовувати різьбонарізний патрон. Також слід зауважити, що в рамках існуючої технології оброблення зокрема різьбових отворів виконується з попереднім ручним розмічуванням, що знижує продуктивність виробництва та потребує робітників високої кваліфікації.

Проблемним є оброблення глибокого отвору $\varnothing 8H14$, оскільки вона потребує багатоходового свердління, що знижує продуктивність виробництва. Оброблення глибоких отворів ускладнене можливою деформацією осьового інструмента, що в свою чергу призводить до втрати геометричної точності поверхні.

Оброблення двох отворів під різьблення $M14 \times 1,5-7H$ проводиться на циліндричній поверхні $\varnothing 325$: для усунення первинного зміщення осьового інструменту необхідно застосовувати попереднє центрування.

Також ускладнено обробку отвору $\varnothing 12$, розташованого під кутом $\angle 35^\circ$ до циліндричної поверхні $\varnothing 325$. Для усунення первинного зміщення осьового

інструменту в базовій технології виконують попереднє фрезерування плоскої ділянки на циліндричній сходинці заготовки.

Висока розмірна точність окремих поверхонь деталі ($\varnothing 250H7$, $\varnothing 270H7$, R260h9), низька шорсткість поверхонь (1,6–0,4 мкм Ra), високі вимоги щодо точності взаємного розташування поверхонь (допуски радіального биття поверхонь щодо осі отворів $\varnothing 220H7$ і $\varnothing 270H7$ у межах 0,02 мм та 0,08 мм) також є нетехнологічними ознаками. Все це потребує використання додаткових чистових та фінішних (оздоблювальних) етапів оброблення, що вимагає застосування устаткування високої точності, специфічної оснастки. Водночас це призводить до зростання витрат праці, знижує продуктивність виробництва та підвищує його собівартість.

В результаті аналізу технологічності за якісними ознаками можна зробити висновок: корпус підшипників 1.1630-20.20-02 загалом є технологічним виробом.

Аналіз технологічності конструкції деталі за кількісними ознаками.
Рівень технологічності конструкції деталі за точністю обробки визначають за формулою

$$K_T = 1 - 1/T_{cp},$$

де T_{cp} – середній квалітет точності оброблюваних поверхонь;

$$T_{cp} = \frac{\sum T_i \cdot n_i}{\sum n_i},$$

де T_i – квалітет точності оброблюваної поверхні;

n_i – кількість розмірів відповідного квалітету точності.

$$T_{cp} = \frac{7 \cdot 18 + 9 \cdot 1 + 11 \cdot 5 + 14 \cdot 18 + 16 \cdot 1}{43} = 10,65.$$

В результаті маємо

$$K_T = 1 - 1/10,65 = 0,91.$$

Рівень технологічності конструкції щодо шорсткості поверхонь визначають за формулою

$$K_{ш} = 1 - 1/Ш_{ср},$$

де $Ш_{ср}$ – середня шорсткість оброблених поверхонь, мкм.

$$Ш_{ср} = \frac{\sum Ш_i \cdot n_i}{\sum n_i},$$

де $Ш_i$ – шорсткість обробленої поверхні, мкм;

n_i – кількість поверхонь деталі з відповідною шорсткістю.

$$Ш_{ср} = \frac{0,4 \cdot 1 + 1,6 \cdot 3 + 3,2 \cdot 18 + 6,3 \cdot 5 + 12,5 \cdot 16}{43} = 6,84 \text{ мкм.}$$

$$K_{ш} = 1 - 1/6,84 = 0,85.$$

Рівень технологічності конструкції деталі щодо використання матеріалу:

$$K_{в.м} = M_d/M_{заг},$$

де M_d – маса деталі, кг;

$M_{заг}$ – маса заготовки, кг.

В результаті маємо

$$K_{в.м} = 126/270 = 0,47.$$

Отже, за результатами кількісного аналізу технологічності конструкції деталі можна зробити висновок: конструкція деталі є технологічною з оцінкою «задовільно».

1.5 Аналіз існуючого маршруту оброблення заготовки

Для побудови оптимального маршруту механічного оброблення заготовки проаналізуємо базовий технологічний процес механічної обробки «корпусу підшипників», див. таблицю 1.2.

Таблиця 1.2 – Стислий опис існуючого технологічного процесу виготовлення деталі

№ операції	Найменування операції	Зміст операції	Базування заготовки	Устаткування
1	2	3	4	5
005	Лиття металів і сплавів	Лиття заготовки в піщано-глинясті форми		Машина для лиття
010	Термічна	Відпал для зняття внутрішніх напружень		Піч
015	Слюсарна			Верстак
020	Дробоструминна			Установка дробоструминна
025	Слюсарна			Верстак
030	Токарна	Точити літники та приливи	В патроні за зовнішньою циліндричною поверхнею з упором в торець	Токарно-гвинторізний верстат моделі 165
035	Токарна	Чорнова обробка. Установ А. Підрізати торці заготовки, обточити поверх і розточити зсередини з припуском 5 мм на бік. Установ Б. Підрізати протилежний торець, обточити фланець поверху і розточити зсередини з припуском 5 мм на бік.	В патроні за зовнішньою циліндричною поверхнею з упором в торець	Токарно-гвинторізний верстат моделі 165
040	Токарна	Обрізати літник	В патроні за зовнішньою циліндричною поверхнею з упором в торець	Токарно-гвинторізний верстат моделі 165

1	2	3	4	5
045	Токарна	Чистова обробка. Точити по всіх зовнішніх і внутрішніх поверхнях з одного боку.	В патроні за зовнішньою циліндричною поверхнею з упором в торець	Токарно-гвинторізний верстат з ЧПК моделі 16K50Ф3
050	Токарна	Чистова обробка. Точити по всіх зовнішніх і внутрішніх поверхнях з іншого боку.	В патроні за зовнішньою циліндричною поверхнею з упором в торець	Токарно-гвинторізний верстат з ЧПК моделі 16K50Ф3
055	Розмічувальна	Розмітити 6 отворів М12-7Н, 6 отворів М16-7Н, 2 отвори М12-7Н, 2 отвори М14×1,5-7Н, 1 отвір Ø8, 1 отвір Ø8 під кутом $\angle 35^\circ$.	-	Плита розмічувальна
060	Свердлильна	Установ А. Свердлити по розмітці 6 отворів Ø10,2 під різьблення М12-7Н, зенкувати фаски $1,6 \times 45^\circ$; свердлити отвір 8 глибиною 140 мм; свердлити 2 отвори Ø10,2 під різьблення М12-7Н, зенкувати фаски. Установ Б. Свердлити 6 отворів Ø14 під різьблення М16-7Н, зенкувати фаски. Установ В. Свердлити 2 отвори Ø12,5 під різьблення М14×1,5-7Н, цекувати Ø20×2, зенкувати фаски $1,6 \times 45^\circ$.	За торцевою й зовнішньою циліндричною поверхнями	Радіально-свердлильний верстат мод. 2М55
065	Розточувальна	Установ А. Свердлити отвір Ø12 під кутом $\angle 35^\circ$. Установ Б. Фрезерувати паз шириною 8 мм, глибиною 10 мм.	По торцевій та зовнішній циліндричній поверхнях та отворі М16	Горизонтально-розточувальний верстат мод. 2636
070	Слюсарна	Нарізати в отв. різі: М12-7Н, М14×1,5-7Н, М16-7Н		Верстак
075	Токарна	Точити криволінійну поверхню R260h9	По торцевій та зовнішній циліндричній поверхнях	Токарно-гвинторізний верстат моделі 165
080	Полірувальна	Полірувати посадкові поверхні	- « -	Токарно-гвинторізний верстат моделі 165
085	Слюсарна	Притерти сферичну поверхню		Верстак
090	Маркувальна			Пристрій для маркування
095	Контрольна	Контролювати точність та якість основних поверхонь		Стіл ВТК.

Корпус підшипників виготовляється АТ «СМНВО-Інжиніринг». Під час виготовлення деталі на діючому виробництві використовують маршрутно-операційний опис технологічного процесу (ТП). Маршрут механічної обробки заготовки здебільшого описаний як перелік операцій, без зазначення

найменувань верстатів, змісту переходів, операційних припусків та розмірів, вимог щодо точності та якості поверхонь, оснастки, режимів різання та технічних норм часу. В комплекті технологічної документації на виготовлення корпусу підшипників наведені операційні ескізи та карти лише на токарно-гвинторізні операції 035, 045, 050 та свердлильну операцію 060. Отже під час складання таблиці 1.2 використовувалась вся доступна інформація, в тому числі одержана під час спілкування з робочими на відповідних робочих місцях.

Аналізуючи існуючий ТП механічної обробки корпусу підшипників можна назвати таке. Заготовку для деталі отримують литтям 2-ї групи ГОСТ 977-88, з подальшим термообробленням та дробоструминною операціями для зняття внутрішніх напружень після заготівельної операції. Такий метод отримання заготовки є доволі простим, водночас спостерігається високий коефіцієнт використання матеріалу: $K_{в.м} = 0,47$.

Порівнюючи заводський технологічний процес з типовим [2, 3], можна відзначити, що на першій механічній операції 030 проводиться обдирка литників і припливів, а потім на токарній операції 035 виконується чорнова обробка зовнішніх і внутрішніх поверхонь заготовки з припуском 5 мм на бік для подальшого механічного оброблення. Потім на токарній операції 040 обрізається центральний литник. Останню операцію 040 можна поєднати з аналогічною операцією 030 з обрізання литників на заготівлі.

Після завершення чорнового етапу механічної обробки заготовки, на токарних операціях 045 і 050 виконується чистова токарна обробка всіх зовнішніх і внутрішніх поверхонь заготовки. далі чистові, що відповідає загальноприйнятим рекомендаціям щодо складання ТП. Однак надалі цей принцип порушується, оскільки після чистової токарної обробки виконуються свердлильні та фрезерні операції з обробки отворів та пазів на торцях та зовнішньої циліндричної поверхнях заготовки, які є чорновими. Однак обробка зазначених поверхонь – міра вимушена, оскільки запобігає поломкам токарних підрізних і прохідних різців, якби останні використовувалися при підрізуванні

торців і проточуванні зовнішніх циліндричних поверхонь після свердління отворів та фрезерування паза.

В кінці ТП механічної обробки заготовки проводиться токарна операція 075 з проточування криволінійної поверхні R260h9, полірувальна операція 080 з полірування посадкових поверхонь 270H7 і 250H7.

Завершується обробка заготовки маркувальною операцією 085, контрольною операцією 090 та слюсарною операцією 095.

За цим технологічним процесом заготовка відповідає кресленню щодо фактичних припусків на обробку. Усі технічні вимоги можна забезпечити. Як чорнову базу спочатку обрані зовнішні циліндричні поверхні заготовки та її торець, як найбільш розвинуті з точки зору простоти форм та габаритів.

Подальший аналіз існуючого технологічного процесу та порівняння його з типовим показує, що він складений узагальнено, без детального поопераційного опису. Не зрозуміло, як саме потрібно базувати деталь. На токарних операціях не зазначено послідовність обробки поверхонь, а глибина різання зазначається узагальнено: «...точити поверхні з припуском 5 мм на бік». До того ж технологічний процес передбачає недостатню кількість етапів для обробки найбільш точних поверхонь деталі по 7 квалітету точності. Для обробки $\varnothing 250H7$ та $\varnothing 270H7$ реалізуються лише два етапи: чорнове та чистове точіння, замість трьох етапів. Водночас оброблення сферичної поверхні R260h9 виконують у чотири етапи, що загалом є вірним, оскільки необхідно забезпечити шорсткість 0,4 мкм Ra. Звичайно, полірувальна операцію проводиться і для обробки внутрішніх циліндричних поверхонь $\varnothing 250H7$ і $\varnothing 270H7$, проте полірування не забезпечує розмірної точності по IT7, а дозволяє лише досягти низької шорсткості оброблюваних поверхонь в 1,6 мкм Ra. Тут, для отримання точності поверхонь по IT7, бажано проводити обробку в 3 етапи, виконуючи чорнове, півчистове та чистове точіння зазначених поверхонь. У той же час слід зазначити і те, що в заводському технологічному процесі після токарної чорнкової обробки на чистове точіння і розточування зовнішніх і внутрішніх циліндричних поверхонь залишається завищений припуск 5 мм на бік. Тут необхідно уточнити

величину припуску під півчистове та чистове точіння розрахунково-аналітичним методом [2].

У заводському ТП механічної обробки корпусу підшипників майже повністю дотримується принцип поетапності, коли послідовно виконуються чорнова, півчистова та чистова обробка заготовки.

Аналіз свердлильної та розточувальної операцій показує, що в аналізованому ТП перед свердлильною операцією використовують ручне розмічування, що при його усуненні, за рахунок застосування автоматизованих верстатів з ЧПК, є резервом удосконалення ТП. Застосування спеціальних пристроїв дозволить повністю відмовитися від розмічувальної операції та уникнути малопродуктивної, ручної праці.

Ручна праця використовується на полірувальній операції та на слюсарних операціях, зокрема, на операції 070 з нарізування в отворах метричних різьблень. Тут можна механізувати процес нарізування різьблень на верстатах, відразу після свердління в заготівлі відповідних отворів. Можлива механізація та полірувальна операція при використанні спеціальних суперфінішних пристроїв для обробки внутрішніх циліндричних поверхонь.

На всіх операціях заводського ТП використовується універсальне обладнання та технологічна оснастка. З метою підвищення продуктивності виробництва, забезпечення сталості точності та якості оброблюваних поверхонь та поліпшення умов праці робочих потрібно розглянути можливість підвищення рівня механізації та автоматизації, що є прийнятним для умов серійного виробництва, зокрема через ширше використання верстатів з ЧПК та механізованих верстатних пристроїв. Це дозволило б знизити кваліфікацію робітників та підняти продуктивність обробки, повністю усунувши ручну працю. При цьому дотримується принцип сталості баз: лезова обробка всіх циліндричних поверхонь здійснюється в патроні по зовнішній поверхні з упором в торець. При обробці отворів та пазів можна використовувати торець заготовки та її центральний отвір.

Отже, базування, використовуване обладнання та оснащення відповідають заданій програмі випуску, але не прийнятій формі організації дрібносерійного виробництва. Верстати розміщуються за видами обладнання. Однак, прийнята групова форма організації робіт передбачає формування предметно-замкнутої ділянки з розташуванням верстатного обладнання згідно з маршрутом обробки заготовки. Заготовки встановлюються на верстати та транспортуються між операціями за допомогою кран-балки.

Верстати, застосовувані в базовому ТП є морально та фізично застарілими. Під час формування перспективного технологічного процесу слід використовувати сучасні моделі металорізальних верстатів з елементами автоматизації.

У заводському ТП як ріжучий інструмент застосовується нормалізований, універсальний інструмент: прохідні, підрізні та розточувальні різці, оснащені пластинками твердого сплаву Т5К10 і Т15К6 (для чорнового та чистового оброблення матеріалу заготовки відповідно), спіральні свердла (для оброблення отворів) та кінцеві фрези (для оброблення пазів) зі швидкорізальної сталі Р6М5. Виняток становлять випадки, коли поверхні неможливо обробити стандартним інструментом. Це спеціальні канавкові різці для оброблення внутрішніх канавок. Як вимірювальний інструмент застосовується, в основному, універсальний шкальний інструмент у вигляді штангенциркулів, мікрометрів, індикаторів, зразків шорсткості. Для контролю точності розмірів за ІТ7 і ІТ9 застосовують граничні калібри і шаблон, що, з одного боку дозволяє забезпечити високу продуктивність контролю точності поверхонь, але з іншого боку, не надає корисної інформації про фактичну точність розмірів. Загалом, все це дозволяє забезпечити необхідну точність та якість оброблюваних поверхонь деталі, як за точністю розмірів, так і за точністю їх форми та взаємного розташування поверхонь, та їх шорсткості.

1.6 Висновок

1. Маршрут механічного оброблення заготовки загалом є раціональним для прийнятих умов виробництва і може бути використаний в рамках перспективної технології.

2. Кількість етапів оброблення поверхонь за 7-м квалітетом точності слід збільшити до 3-х.

3. Для підвищення ефективності технологічного процесу механічного оброблення заготовки слід виконати його розмірний аналіз в контексті формування діаметральних та осьових розмірів.

4. Слід розглянути можливість заміни малопродуктивного процесу полірування на суперфінішування. Суперфінішування з використанням мобільних суперфінішних головок може бути реалізоване на універсальному токарно-гвинторізному верстаті, водночас забезпечуючи високу продуктивність різання, інтенсифікацію виправлення похибок розмірної точності та точності форми оброблюваних поверхонь.

5. Спосіб одержання заготовки в піщано-глинясті форми є малопродуктивним для умов серійного виробництва. Остаточне рішення щодо способу одержання заготовки слід приймати за результатами техніко-економічного обґрунтування.

6. Слід переглянути верстатний парк та оснастку, використовувані в базовому технологічному процесі. Під час проектування перспективного технологічного процесу виготовлення деталі перевагу слід віддавати сучасним моделям верстатів, оснащених засобами автоматизації, та верстатних пристроїв, оснащених механізованими приводами закріплення заготовки.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБЛЕННЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ

2.1 Складання раціонального маршруту технологічного процесу виготовлення деталі

Аналіз можливих методів оброблення елементарних поверхонь (МОЕП) корпусу підшипників, зокрема, внутрішніх циліндричних поверхонь $\varnothing 250H7$, $\varnothing 270H7$, показує, що в заводському ТП для отримання точності поверхонь за IT7 недостатньо 2-х кратного оброблення. Бажано проводити оброблення зазначених поверхонь у 3 етапи: чорнове, півчистове та чистове точіння.

Занадто диференційована токарна операція 075 з точіння криволінійної поверхні R260h9. До цієї операції як раз і можна додати чистовий етап обробки внутрішніх посадкових поверхонь $\varnothing 250H7$, $\varnothing 270H7$. При цьому підвищиться концентрація зазначеної операції, що є прийнятним для умов серійного виробництва, і знизить собівартість обробки.

У заводському ТП, переважно, дотримується принцип поетапності під час обробки поверхонь «корпусу підшипників». Разом з тим, останні лезові операції з свердління отворів, фрезерування паза та цекування ділянок $\varnothing 20$ на циліндричній зовнішній поверхні заготовки, встановлені з порушенням цього принципу, що, однак, є мірою вимушеною, про що було сказано в пункті 1.5 цієї роботи. Разом з тим, останню токарну чистову операцію можна виконувати після всіх свердлувальних та розточувальних операцій, що дозволить повністю дотриматися принципу поетапності.

Аналіз свердлувальної та розточувальної операцій показує, що їх можна виконувати на верстатах з ЧПК, виключивши розмічувальну операцію.

Як зазначалося раніше, у заводському ТП використовується застаріле устаткування. На токарних операціях використовується токарно-гвинторізний верстат моделі 164, а на свердлильних – радіально-свердлильний верстат моделі 2M55. У проектованому технологічному процесі механічної обробки корпусу

підшипників слід ширше використовувати верстати з ЧПК, що усуне попередню, ручну розмітку, особливо на фрезерних та свердлильних операціях, підвищить продуктивність обробки, зменшить її собівартість.

З урахуванням висловлених пропозицій виконаємо аналіз методів обробки елементарних поверхонь деталі. В результаті аналізу були визначені так звані укрупнені операції ТП, що відповідають етапам обробки: Е1 (заготовчий), Е3 (термічний 1-й), Е4 (півчистовий 1-й), Е6 (півчистовий 6-й), Е8 (чистовий 1-й), Е11 (чистовий 3-й). Таким чином, перспективний технологічний процес механічної обробки корпусу підшипників, складається з 6 укрупнених операцій. Операції 030 та 040 з обрізання литників об'єднуються.

Аналіз укрупнених операцій, зокрема, Е4, показує, що цю операцію не можна реалізувати одному верстаті через розбіжності у методах обробки – фрезерування, свердління, точіння. Тому поділяємо цю укрупнену операцію на три: токарну, що виконується на токарно-гвинторізному верстаті, свердлильну, що виконується на радіально-свердлильному верстаті і розточувальну, що виконується на горизонтально-розточувальному верстаті. При цьому, зробимо деякий перерозподіл оброблюваних поверхонь між зазначеними свердлильною та розточувальною операціями з метою вирівнювання часу обробки на них.

Подальший аналіз показує, що укрупнену операцію Е6 розбиваємо на дві. Зокрема, при використанні універсального токарно-гвинторізного верстата всі види токарних робіт з двох установ можна було б реалізувати на одній токарно-гвинторізній операції. Однак, застосування токарного верстата з ЧПК з пневматичним патроном, через великі перепади діаметрів заготовки, що закріплюється на різних установках, вимагатиме використання або двох різних патронів, або тривалого переналагодження одного з них, що не прийнятно в межах однієї операції. Тому й розбиваємо токарну операцію на дві операції. При цьому, нарізування різей М12-7Н, М14×1,5-7Н і М16-7Н об'єднаємо із свердлінням отворів з етапу Е4, виконавши їх на свердлильній операції.

А ось аналіз оброблюваних поверхонь з укрупненою чистовою операцією E8 дозволяє їх реалізувати на одній токарній операції з використанням токарного верстата з ЧПК, оскільки всю обробку можна зробити з одного установа.

Завершуємо технологічний процес механічної обробки корпусу підшипників на укрупненій операції E11. Тут зробимо оздоблювальну обробку посадкових поверхонь заготовки на універсальному токарно-гвинторізному верстаті з використанням спеціального суперфінішного пристрою, що встановлюється в різцетримачі токарного верстата.

Деталь має розвинені, відкриті поверхні, що повною мірою дозволяє дотриматися як принципу сталості баз, так і принципу суміщення баз.

Широке використання верстатів із ЧПК, спеціалізованого оснащення дозволить виключити ручні розмічувальні операції.

В результаті проведеного аналізу пропонується наступний маршрут ТП обробки корпусу підшипників, див. таблицю 2.1.

Як видно з таблиці 2.1 у новому варіанті маршруту ТП механічної обробки корпусу підшипників порівняно із заводським ТП скорочено на 3 операції загальна їх кількість – з 19 до 16, що пояснюється використанням принципу концентрації токарної та свердлильної операцій. Водночас ми додали на токарній операції 060 додаткові переходи, що дозволяють для забезпечення точності ІТ7 ($\varnothing 250H7$, $\varnothing 270H7$) вести обробку заготовки в 3 етапи.

Таблиця 2.1 – Перспективний технологічний процес виготовлення деталі

№ операції	Найменування операції	Зміст операцій	Базування	Устаткування
1	2	3	4	5
005	Лиття металів і сплавів	Лиття заготовки в піщано-глинясті форми		Машина для лиття
010	Термічна	Відпал для зняття внутрішніх напружень		Піч
015	Слюсарна			Верстак
020	Дробоструминна			Установка дробоструминна
025	Слюсарна			Верстак

1	2	3	4	5
030	Токарно-гвинторізна	Точити литники і приливи	В патроні за зовнішньою циліндричною поверхнею з упором в торець	Токарно-гвинторізний верстат моделі SINUS 400/3000 D (Knuth)
035	Токарно-гвинторізна	Чорнова обробка. Установ А. Підрізати торці заготовки, обточити поверх і розточити зсередини з припуском 5 мм на бік. Установ Б. Підрізати протилежний торець, обточити фланець поверху і розточити зсередини з припуском 5 мм на бік.	В патроні за зовнішньою циліндричною поверхнею з упором в торець	Токарно-гвинторізний верстат моделі SINUS 400/3000 D (Knuth)
040	Токарна з ЧПК	Півчистова обробка. Точити по всіх зовнішніх і внутрішніх поверхнях з одного боку	В патроні за зовнішньою поверхнею з упором в торець	Токарний верстат з ЧПК моделі Forceturn 630.15
045	Токарна з ЧПК	Півчистова обробка. Точити по всіх зовнішніх і внутрішніх поверхнях з іншого боку	В патроні за зовнішньою поверхнею з упором в торець	Токарний верстат з ЧПК моделі Forceturn 630.15
050	Комплексна ЧПК з	Установ А. Свердли 6 отворів Ø10,2 глибиною 26 мм і свердли 2 отвори Ø10,2 глибиною 22 мм, зенкувати в 8 отворах фаски 1,6×45°, нарізати різьблення M12-7H у 8 отворах; свердли отвір Ø8 глибиною 140 мм. Установ Б. Свердли 6 отворів Ø14, зенкувати фаски 1,6×45°, нарізати різьблення M16-7H.	За торцевою і зовнішньою циліндричною поверхнями За торцевою і зовнішньою циліндричною поверхнями та отвором	Вертикальний обробний центр з ЧПК моделі V1100
055	Комплексна ЧПК з	Установ А. Фрезерувати паз завширшки 8 мм, глибиною 10 мм. Установ Б. Цекувати 2 місця Ø20×2, свердли 2 отвори Ø12,5, зенкувати фаски 1,6×45°, нарізати різьблення M14×1,5-7H. Установ В. Фрезерувати майданчик Ø8 під кутом ∠35°, свердли отвір Ø12 під кутом ∠35°.	За торцевою і зовнішньою циліндричною поверхнями та отвором M16	Горизонтальний обробний центр з ЧПК моделі MDH80
060	Токарна з ЧПК	Точити криволінійну поверхню R260h9, розточити посадкові поверхні Ø250H7 та Ø270H7	За торцевою і зовнішньою циліндричною поверхнями	Токарний верстат з ЧПК моделі Forceturn 630.15
065	Суперфінішна	Суперфінішувати посадкові поверхні	За торцевою і зовнішньою циліндричною поверхнями	Токарно-гвинторізний верстат моделі SINUS 400/3000 D (Knuth)
070	Слюсарна	Притерти сферичну поверхню		Верстак

1	2	3	4	5
075	Маркувальна			Пристрій для маркування
080	Технічний контроль	Контролювати точність та якість основних поверхонь		Стіл ВТК

У перспективному ТП передбачається широке застосування верстатів із ЧПК [6–9], що дозволить скоротити малопродуктивні методи ручного розмічування. Зокрема, усунено розмічувальну операцію перед свердлильною операцією з ЧПК 050, крім того, на даній операції проводиться нарізання різьблень після свердління на ній отворів. В результаті скорочено ручну слюсарну операцію з нарізування різьблень. У цьому разі скорочується і час на операцію, отже, і собівартість обробки заготовки.

2.2 Обґрунтування вибору способу одержання заготовки

У базовому ТП заготовку корпусу підшипників одержують литтям у піщано-глинисті форми. Для умов одиничного та дрібносерійного виробництва цей спосіб литва є цілком прийнятним, але для середньосерійного типу виробництва доцільним є використання більш продуктивного способу. Водночас можна сказати, що трудомісткість лиття такої заготовки є порівняно невеликою, водночас спостерігається досить високий коефіцієнт використання матеріалу:

$$K_{в.м} = M_d / M_{заг} = 126 / 268 = 0,47.$$

де M_d – маса деталі, кг;

$M_{заг}$ – маса заготовки, кг.

Альтернативним способом одержання вилівка можна вважати литво за виплавлюваними моделями. В такому разі коефіцієнт використання матеріалу підвищується до 0,6 (орієнтовно). Однак зазначений спосіб литва є значно дорожчим.

Обґрунтування вибору методу одержання заготовки за технічними ознаками віддає перевагу литтю за виплавлюваними моделями. Метод отримання заготовки за виплавлюваними характеризується меншими припусками та напусками, меншою вагою заготовки, меншими обсягами подальшого механічного оброблення поверхонь різанням, але є надзвичайно

дорогим. Устаткування та оснастка за малих річних об'ємів випуску виробів не окупаються. Так чи інакше, остаточне рішення про оптимальний метод одержання виливка слід приймати лише після економічного аналізу за альтернативними варіантами.

Собівартість виливок визначають за формулою [2]:

$$S_{заг} = \left(\frac{C_i}{1000} M_{заг} k_T k_C k_B k_M k_{\Pi} \right) - (M_{заг} - M_{вдх}) \frac{S_{вдх}}{1000},$$

де C_i – базова вартість 1 т виливок;

$k_T, k_C, k_B, k_M, k_{\Pi}$ – коефіцієнти, що залежать відповідно від класу точності, групи складності, маси, марки матеріалу та об'єму виробництва виливок.

$S_{вдх}$ – ціна 1 т відходів.

Для лиття в піщано-глинисті форми з ручним формуванням маємо: $k_T = 1,05$ – для 1 т степені точності [2]; $k_M = 1,22$ – для виливок з вуглецевої сталі; $k_B = 0,74$ – для сталевих виливків масою до 500 кг; $k_C = 0,86$ – для виливків 1-ї групи складності; $k_{\Pi} = 1$ – для 3-ї групи серійності за річної програми випуску 250 штук.

Вартість 1 т сталю литва в піщано-глинисті форми становить: $C_1 = 1430$ грн; вартість відходів: $S_{вдх} = 500$ грн; маса заготовки: $Q_1 = 268$ кг; маса готової деталі: $q = 126$ кг:

$$S_{заг1} = \left(\frac{64300}{1000} \cdot 268 \cdot 1,05 \cdot 1,22 \cdot 0,74 \cdot 0,86 \cdot 1,0 \right) - (268 - 126) \frac{500}{1000} = 13270 \text{ грн.}$$

Для литва за виплавленими моделями: $k_T = 1,0$ – для сталевих виливків; $k_C = 0,86$ – для 1-ї групи складності виливків; $k_B = 0,38$ – для чавунних виливків масою більше 10 кг; $k_M = 1,0$ – для виливків з вуглецевої сталі; $k_{\Pi} = 1,23$ – для 3-ї групи серійності за річної програми випуску 250 штук.

Собівартість 1 т сталю литва за виплавленими моделями становить: $C_2 = 3870$ грн; маса заготовки: $Q_2 = 230$ кг. В результаті маємо:

$$S_{заг2} = \left(\frac{168700}{1000} \cdot 230 \cdot 1,0 \cdot 0,86 \cdot 0,38 \cdot 1,0 \cdot 1,23 \right) - (230 - 126) \frac{500}{1000} = 15020 \text{ грн.}$$

Отже, литво в піщано-глинисті форми за собівартістю в 1,13 рази ефективніше ніж литво за виплавленими моделями.

2.3 Визначення припусків, розмірів та технічних вимог на виготовлення заготовки

2.3.1 Визначення припусків та розмірів заготовки статистичним методом

Згідно з визначеним в п. 2.2 методом одержання заготовки визначимо припуски та допуски на заготовку статистичним методом згідно з ДСТУ 8981:2020 [10].

Для зазначеної деталі точність виливки 11-9-15-11 див. 2,4 ДСТУ 8981:2020, ряд припусків – 9, шорсткість поверхонь – 25 мкм за критерієм Ra. Результати розрахунків розмірів виливка наведемо в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Розрахунок припусків та розмірів заготовки, в міліметрах

Розмір деталі	Допуски розмірів виливки	Допуски форми виливки	Загальні допуски елементів виливки	Загальний припуск на сторону виливки	Розрахунок розмірів заготовки	Остаточні розміри заготовки з допусками
1	2	3	4	5	6	7
Ø470с11	7,0	3,2	9,0	6,0	$470+6,0 \times 2=482,0$	Ø482±4,5
Ø340	6,4	2,4	7,0	4,9	$340+4,9 \times 2=349,8$	Ø350±3,5
Ø325	6,4	2,4	7,0	4,9	$325+4,9 \times 2=334,8$	Ø335±3,5
Ø415	7,0	3,2	9,0	6,0	$415-6,0 \times 2=403,0$	Ø403±4,5
Ø270Н7	6,4	2,0	7,0	5,5	$270-5,5 \times 2=259,0$	Ø259±3,5
Ø250Н7	5,6	1,6	7,0	5,5	$250-5,5 \times 2=239,0$	Ø239±3,5
45	4,0	0,8	4,0	3,4	$45+4,9-3,4=46,5$	46,5±2,0
175	5,6	1,2	6,4	4,5	$175+4,9-4,5=175,4$	175,5±3,2
109	5,0	0,8	5,0	4,1	$109+4,9+4,1=118,0$	118,5±2,5
190	5,6	1,2	6,4	4,5	$190+4,9-4,5=190,4$	190,5±3,2
400с11	6,4	2,4	7,0	4,9	$400+4,9 \times 2=409,8$	410±3,5

Ескіз виливка, побудований згідно з визначеними величинами розмірів наведений рисунку 2.1.

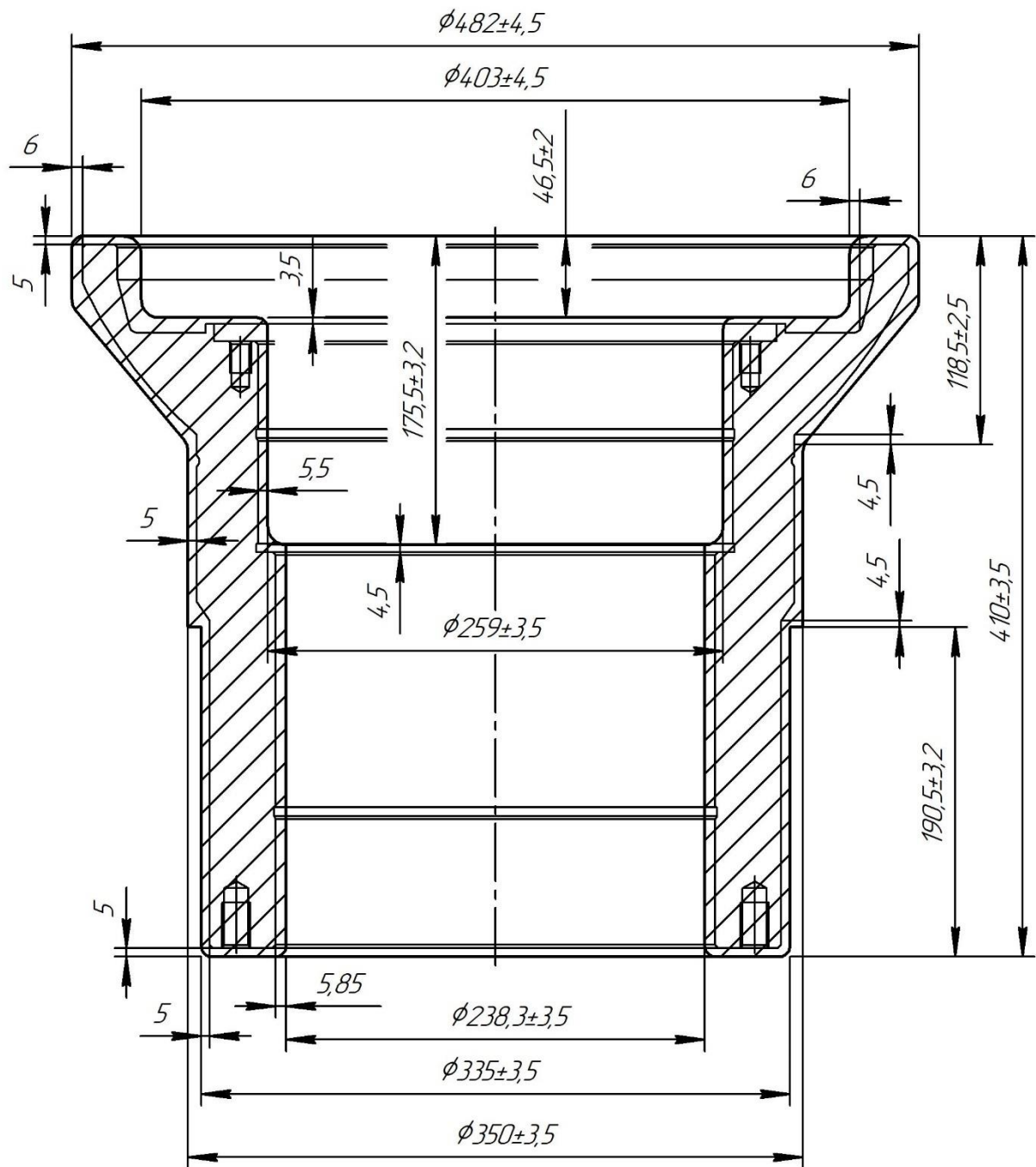


Рисунок 2.1 – Ескіз заготовки (виливка)

Сформулюємо технічні вимоги на виготовлення заготовки:

1. Виливок 2-ї групи ГОСТ 977-88 точність виливка 11-9-15-11 Зм. 2,4 ДСТУ 8981:2020.
2. Технічні вимоги відповідно до ТУ 26-12768-88.
3. Після попереднього механічного оброблення виливок піддати штучному старінню.
4. Незазначені ливарні радіуси – 5...10 мм.

5. Незазначені ливарні ухили – 5°.

6. Маркувати шрифтом 5...6 – Пр. 3 ГОСТ 26020-80 номер кресленника, марку матеріалу заготовки.

7. За незазначених допусків форми й розміщення оброблюваної поверхні вилівка їх сумарну величину беруть рівною 25% допуску розміру від бази до оброблюваної поверхні вилівка.

2.3.2 Визначення операційних припусків та розмірів на оброблення поверхні обертання

Згідно з завданням визначимо операційні припуски та розміри на оброблення поверхні циліндричного отвору $\varnothing 250H7$ розрахунково-аналітичним методом проф. В. М. Кована [2].

Згідно з ТП механічного оброблення отвору $\varnothing 250H7$, останній розточують в три етапи: чорновий, півчистовий та чистовий. Розрахунок припусків та розмірів виконаємо на ЕОМ в програмі PRIPUSK, розробленої кафедрою ТМВІ СумДУ. Для цього необхідно підготувати первинні дані, тобто визначити величини, що є складниками мінімального операційного припуску на певному (і-му) етапі оброблення поверхні:

- шорсткість $R_{z_{i-1}}$, утворювана на попередньому етапі;
- дефектний шар H_{i-1} , утворюваний на попередньому етапі;
- просторові відхилення поверхні ρ_{i-1} , утворювані на попередньому етапі;
- похибка установа заготовки $E_{y_{i-1}}$, утворювана на поточному етапі.

Для зручності величини всіх складників за етапами наведемо у вигляді таблиці 2.2.

Величини R_z , H , ρ , E_y визначимо згідно з рекомендаціями [2].

Таблиця 2.2 – Складники величини мінімального припуску $Z_{\min i}$

Номер та найменування етапу оброблення поверхні	Rz, мкм	H, мкм	ρ , мкм	E_y , мкм
1. Лиття	300	300	2413	
2. Чорнове розточування	100	100	145	700
3. Півчистове розточування	50	50	121	160
4. Чистове розточування	30	30	97	80

Згідно з [2] до мінімального припуску на i -й перехід входить величина:

$$\rho_{i-1} = \sqrt{\rho_{зм}^2 + \rho_{викр}^2},$$

де $\rho_{зм}$ – величина зміщення частин виливка, мкм;

$\rho_{викр}$ – величина викривлення заготовки, мкм.

Отже

$$\rho_{викр} = \Delta_k \cdot D = 1 \cdot 250 = 250 \text{ мкм.}$$

де $\Delta_k = 1$ мкм – питома величина викривлення заготовки, мкм/мм [2];

$D = 250$ мм – діаметр поверхні.

Величина зміщення елементів виливка становить $\rho_{зм} = 2400$ мкм [2].

Отже

$$\rho_{i-1} = \sqrt{2400^2 + 250^2} \approx 2413 \text{ мкм.}$$

З урахуванням принципу спадковості для кожного наступного етапу обробки поверхні під час визначення похибок просторових відхилень поверхонь необхідно враховувати коефіцієнт уточнення K_y :

$$\rho_{остi} = \rho_{i-1} \cdot K_y.$$

де $K_{y1} = 0,06$ – для чорнового розточування;
 $K_{y2} = 0,05$ – для півчистового розточування
 $K_{y3} = 0,04$ – для чистового розточування.
Отже маємо:

$$\rho_{ост1} = 2413 \cdot 0,06 = 145 \text{ мкм},$$

$$\rho_{ост2} = 2413 \cdot 0,05 = 121 \text{ мкм},$$

$$\rho_{ост3} = 2413 \cdot 0,04 = 97 \text{ мкм}.$$

Первинні дані та результати розрахунків операційних припусків та розмірів на оброблення поверхні отвору наведені в додатку В цієї роботи.

2.3.3 Розмірний аналіз технологічного процесу

Виконаємо розрахунок технологічного лінійного розмірного ланцюга (ТЛРЛ) в рамках аналізу технологічного процесу виготовлення корпусу підшипників. Метою такого розрахунку є забезпечення конструкторських розмірів S_i та допусків TS_i , виходячи з раніше спроектованого маршруту механічного оброблення заготовки, див. табл. 2.1. Враховуючи, що ряд конструкторських розмірів S_i , допуски на ескізі деталі не вказані, див. рис. 1.1 та 1.2, ми приймаємо їх згідно з IT14 з відхиленням в тіло деталі.

Виходячи із запропонованого в таблиці 2.1 ТП механічної обробки заготовки, побудуємо схему технологічного лінійного розмірного ланцюга, див. рисунок 2.2. Водночас необхідно враховувати, що кількість замикальних ланок повинна дорівнювати кількості складових ланок:

$$N_{S_i} + N_{Z_{ij}} = 4 + 10 = 14 = N_{A_{ij}} = 14.$$

Граф ТЛРЛ (див. рис. 2.3) будуємо на основі раніше побудованої схеми, наведеної на рис. 2.2.

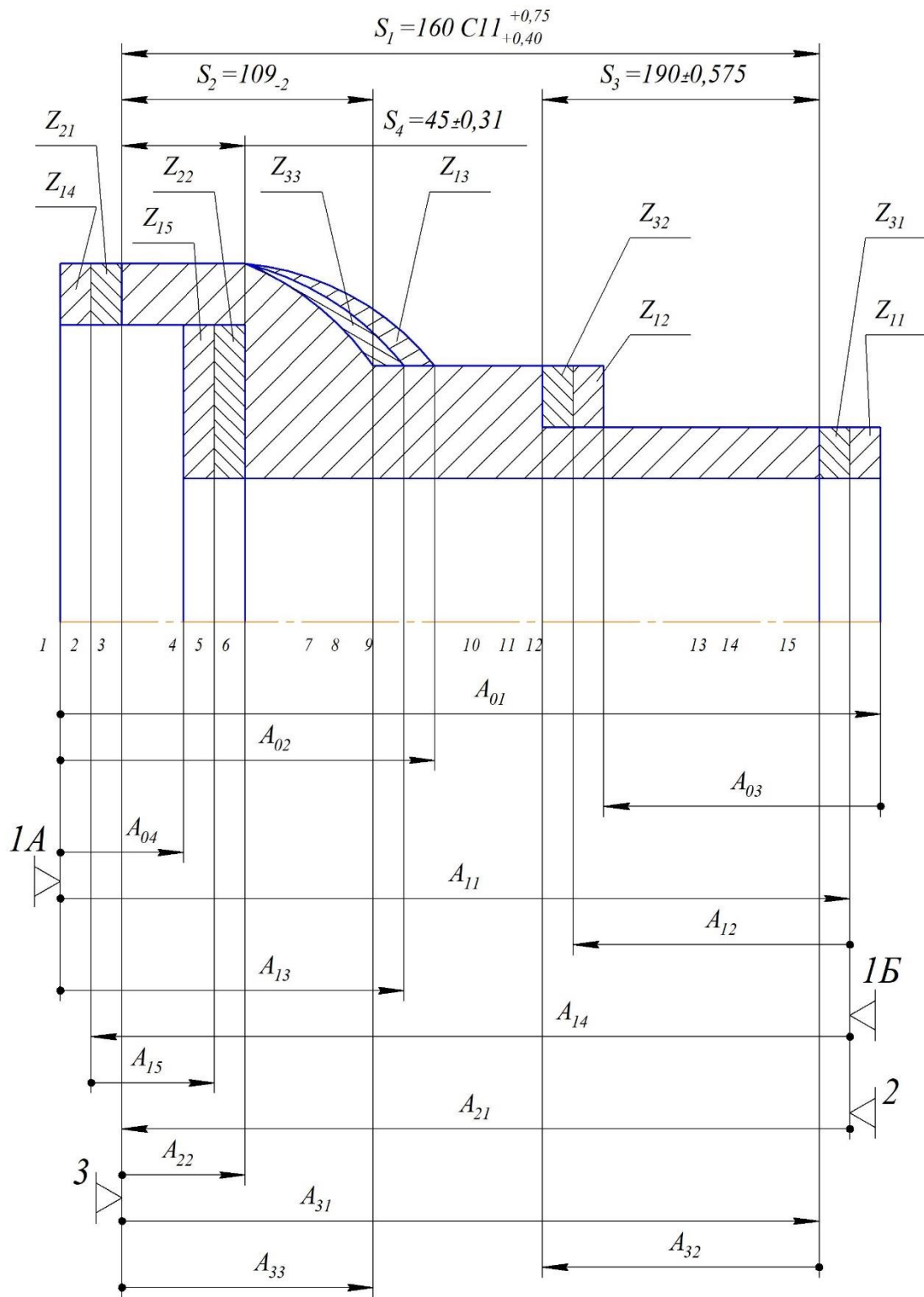


Рисунок 2.2 – Схема технологічного лінійного розмірного ланцюга

Допуски на операційні розміри A_{ij} розраховуємо в таблиці 2.3 згідно з методикою [2]. В графі 3 вказуємо квалітети економічної точності, що відповідають заданим за ТП методам обробки [3], а у графі 6 – значення цих допусків.

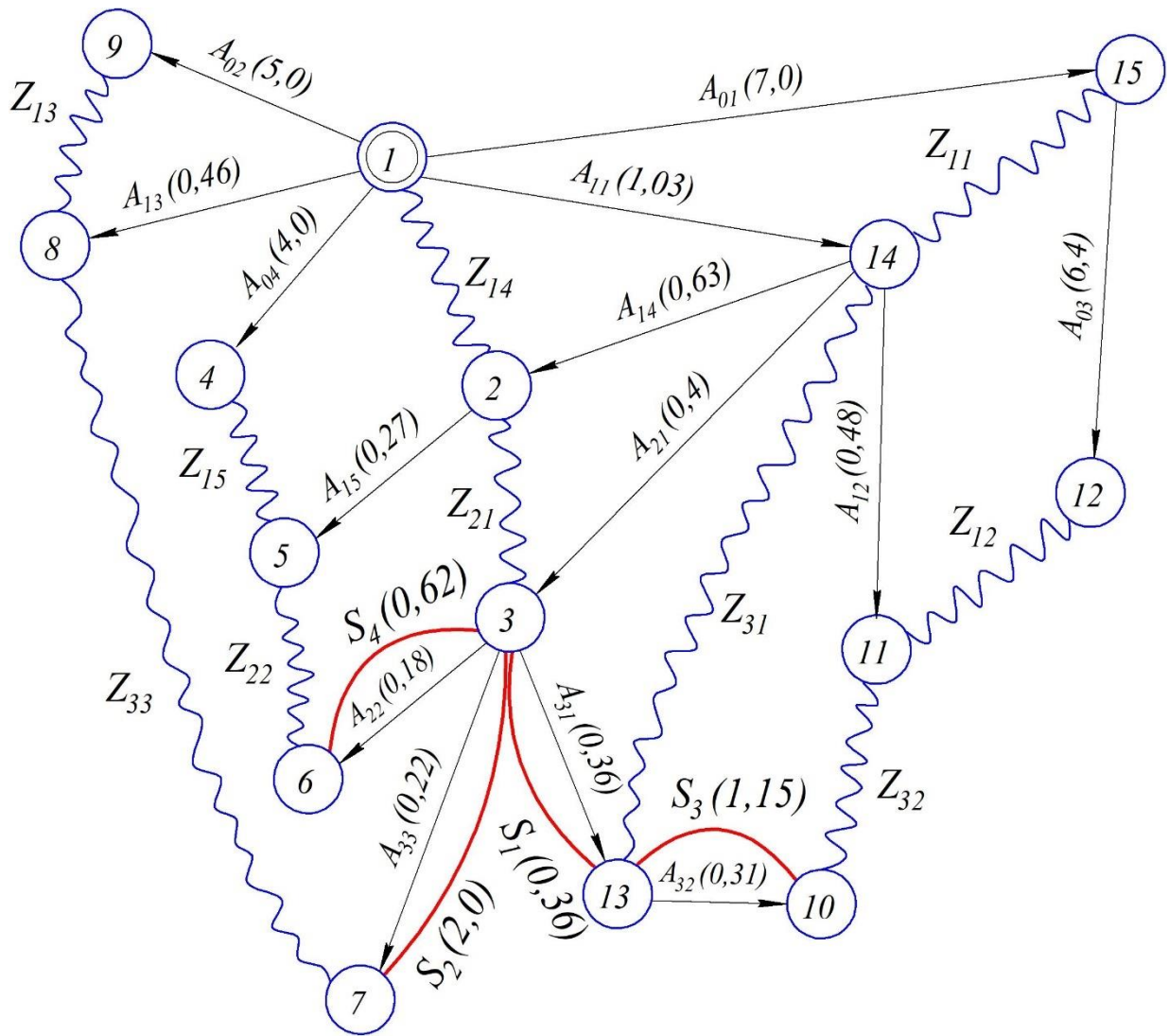


Рисунок 2.3 – Граф технологічного лінійного розмірного ланцюга

В таблиці 2.3 допуски на заготовку (розміри A_{01} , A_{02} , A_{03} , A_{04}) визначались для литва [10]:

$$T_{A_{01}} = 7,0 (\pm 3,5), \quad T_{A_{02}} = 5,0 (\pm 2,5), \quad T_{A_{03}} = 6,4 (\pm 3,2), \quad T_{A_{04}} = 4,0 (\pm 2,0).$$

На розміри заготовки домінуючі похибки відсутні, тому зазначені допуски відповідають їх розрахунковим значенням.

Таблиця 2.3 – Визначення допусків технологічних розмірів, в міліметрах

Індекс розміру	Спосіб оброблення	Точність розмірів заготовки	Шорсткість поверхні мкм	Величина розміру	Величина допуску	Домінуюча похибка	Розрахунковий допуск
1	2	3	4	5	6	7	8
A ₀₁	Литво	11	Ra 50	До 500	7,0	-	7,0
A ₀₂	Литво	11	Ra 50	До 125	5,0	-	5,0
A ₀₃	Литво	11	Ra 50	До 200	6,4	-	6,4
A ₀₄	Литво	11	Ra 50	До 125	4,0	-	4,0
A ₁₁	Чорнове підрізання торця	IT12	Ra 12,5	До 500	0,63	$\rho_{\text{кор}}=0,4$	1,03
A ₁₂	Чорнове підрізання торця	IT12	Ra 12,5	До 250	0,46	$E_{\text{поз}}=0,02$	0,48
A ₁₃	Чорнове підрізання торця	IT12	Ra 12,5	До 120	0,35	$\rho_{\text{кор}}=0,11$	0,46
A ₁₄	Чорнове підрізання торця	IT12	Ra 12,5	До 500	0,63	-	0,63
A ₁₅	Чорнове підрізання торця	IT12	Ra 12,5	До 50	0,25	$E_{\text{поз}}=0,02$	0,27
A ₂₁	Чистове підрізання торця	IT11	Ra 6,3	До 500	0,4	-	0,4
A ₂₂	Чистове підрізання торця	IT11	Ra 6,3	До 50	0,16	$E_{\text{поз}}=0,02$	0,18
A ₃₁	Чистове підрізання торця	IT11	Ra 6,3	До 400	0,36	-	0,36
A ₃₂	Чистове підрізання торця	IT11	Ra 6,3	До 250	0,29	$E_{\text{поз}}=0,02$	0,31
A ₃₃	Чистове підрізання торця	IT11	Ra 6,3	До 120	0,22	-	0,22

На інші операційні розміри домінуючі похибки визначаються в такий спосіб. На першій операції для розмірів A₁₁ і A₁₃ як домінуючу похибку беремо похибку викривлення заготовки [2, 3]:

$$\rho_{\text{кор}} = \Delta_{\text{к}} \cdot L,$$

де $\Delta_{\text{к}} = 1$ мкм/мм – питома величина викривлення;

L – довжина ділянки заготовки.

$$\rho_{\text{кор}A11} = 0,001 \cdot 400 = 0,4 \text{ мм},$$

$$\rho_{\text{кор}A13} = 0,001 \cdot 109 = 0,109 \approx 0,11 \text{ мм}.$$

На інші розміри як домінуючу похибку при розбіжності технологічної та вимірювальної баз беремо похибки базування. Однак, на розміри A₁₂, A₁₅, A₂₂, A₃₂, які обробляються на відповідних операціях іншими розмірами, при

використанні універсальних верстатів, у тому числі верстатів з ЧПК, для яких точність розмірів забезпечується методом пробних проходів або точністю позиціонування та налаштування інструментів, як домінуюча похибки беремо похибки позиціонування (налаштування), яка залежить від точності переміщення супорту даного типу верстата. Зазвичай вона становить $\pm 0,01$ мм, тому:

$$E_{\text{поз}A_{ij}} = 0,02 \text{ мм.}$$

У результаті, в графі 8 проставляємо розрахункові допуски, підсумовуючи економічний допуск із домінуючою похибкою, та на графі технологічного лінійного розмірного ланцюга з рисунка 2.3 поряд з індексами операційних розмірів проставляємо значення розрахункових допусків та робимо перевірку забезпечення технологічними допусками конструкторських допусків:

$$T_{Si} > \Sigma T_{A_{ij}}. \quad (7.4)$$

Як видно з рисунку 2.3, всі конструкторські допуски забезпечуються та браку не буде.

Значення операційних розмірів A_{ij} визначаємо за методикою [2], див. табл. 2.4.

У таблиці 2.4 величину та допуск конструкторських розмірів S_i беремо з креслення корпусу підшипників, а значення мінімальних припусків визначаємо за формулою:

$$Z_{\text{min}ij} = R_{z_{i-1}} + H_{i-1},$$

де $R_{z_{i-1}}$ – шорсткість поверхні заготовки, сформована на попередньому переході;

H_{i-1} – глибина дефектного шару, сформованого на попередньому переході.

Значення $R_{z_{i-1}}$ і H_{i-1} визначимо згідно з [2].

У графу 1 записуємо всі конструкторські розміри S_i з допусками та мінімальні значення припусків Z_{ij} .

Очікувану похибку визначимо з графа на рисунку 2.3 за формулою:

$$\rho_{Si(Z_{ij})} = \Sigma T_{A_{ij}}.$$

і запишемо в графу 3 таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Розрахунок операційних розмірів, в міліметрах

Відомі розміри						Невідомі розміри						
Розміри	Величина і допуск	Очікувана похибка	Середній розрахунковий розмір	Допустиме коригування	Середній скоригований розмір	Розмір	Допуск	Рівняння контуру	Середній розрахунковий розмір	Номинальний розрахунковий розмір	Номинальний скоригований розмір	Середній скоригований розмір
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
S ₁	400 ^{+0,76} _{+0,4}	0,36	400,58	±0,0	400,58	A ₃₃	-0,22	A ₃₃ -S ₂ =0 (1)	108,0	108,11 _{-0,22}	109,0 _{-0,22}	108,89
S ₂	109 _{-2,0}	0,22	108,0	±0,89	108,89	A ₃₂	±0,155	A ₃₂ -S ₃ =0 (2)	190,0	190,0±0,155	190,0±0,155	190,0
S ₃	190±0,575	0,31	190,0	±0,42	190,0	A ₃₁	^{+0,76} _{+0,4}	A ₃₁ -S ₁ =0 (3)	400,58	400 ^{+0,76} _{+0,4}	400 ^{+0,76} _{+0,4}	400,58
S ₄	45±0,31	0,18	45,0	±0,22	45,0	A ₂₂	±0,09	A ₂₂ -S ₄ =0 (4)	45,0	45,0±0,09	45,0±0,09	45,0
Z ₁₁	0,6	8,03	4,615	+∞	4,855	A ₂₁	-0,4	A ₂₁ -A ₃₁ -Z ₃₁ =0 (5)	401,06	401,26 _{-0,4}	401,3 _{-0,4}	401,1
Z ₁₂	0,6	14,91	8,055	+∞	8,495	A ₁₅	±0,135	A ₁₅ +Z ₂₂ -A ₂₂ +A ₂₁ -A ₁₄ =0 (7)	44,555	44,555±0,135	44,55±0,135	44,55
Z ₁₃	0,6	5,46	3,33	+∞	3,91	A ₁₄	-0,63	A ₁₄ -A ₂₁ -Z ₂₁ =0 (6)	401,715	402,03 _{-0,63}	402,03 _{-0,63}	401,715
Z ₁₄	0,6	1,66	1,43	+∞	1,43	A ₁₃	-0,46	A ₁₃ -Z ₃₃ -A ₃₃ +A ₂₁ -A ₁₁ =0 (10)	112,09	112,32 _{-0,46}	112,32 _{-0,46}	112,09
Z ₁₅	0,6	5,93	3,565	+∞	3,98	A ₁₂	±0,24	A ₁₂ -A ₂₁ +A ₃₁ -A ₃₂ +Z ₃₂ =0 (8)	189,645	189,645±0,24	189,64±0,24	189,64
Z ₂₁	0,1	1,03	0,615	+∞	0,615	A ₁₁	-1,03	A ₁₁ -Z ₁₄ -A ₁₄ =0 (9)	403,145	403,66 _{-1,03}	403,66 _{-1,03}	403,145
Z ₂₂	0,1	1,92	1,06	+∞	1,065	A ₀₄	±2,0	A ₀₄ +Z ₁₅ -A ₁₅ +A ₁₄ -A ₁₁ =0(11)	42,415	42,415±2,0	42,0±2,0	42,0
Z ₃₁	0,1	0,76	0,48	+∞	0,52	A ₀₃	±3,2	A ₀₃ -A ₀₁ +A ₁₁ -A ₁₂ +Z ₁₂ =0(13)	186,44	186,44±3,2	186,0±3,2	186,0
Z ₃₂	0,1	1,55	0,875	+∞	0,88	A ₀₂	±2,5	A ₀₂ -Z ₁₃ -A ₁₃ =0 (14)	115,42	115,42±2,5	116,0±2,5	116,0
Z ₃₃	0,1	2,11	1,155	+∞	1,155	A ₀₁	±3,5	A ₀₁ -Z ₁₁ -A ₁₁ =0 (12)	407,76	407,76±3,5	408,0±3,5	408,0

В графу 4 записуємо середню величину конструкторських розмірів та припусків. При цьому середні значення припусків визначимо за формулою:

$$Z_{cp\ ij} = Z_{min\ ij} + \rho_{Zij}/2.$$

Допустиму величину коригування конструкторських розмірів визначимо за формулою:

$$KS_i = \pm \frac{1}{2} \cdot (TS_i - \rho S_i).$$

Для припусків допустиме коригування завжди становить $+\infty$.

Рівняння контурів розмірних ланцюгів для визначення величин A_{ij} будемо з графа на рис. 2.3 і записуємо до графа 9 таблиці 2.4.

Усі розрахунки значень A_{ij} проводимо за їх середніми значеннями:

$$A_{33cp} = S_{cp2} = 108,0 \text{ мм} - \text{записуємо в графу 10.}$$

$$A_{33ном} = A_{33cp} + T_{A33}/2 = 108,0 + 0,11 = 108,11_{-0,22} - \text{в графу 11.}$$

$$A_{33ном}^{кор} = 109,0_{-0,22} - \text{в графу 12.}$$

$$A_{33cp}^{кор} = A_{33ном}^{кор} - T_{A33}/2 = 109,0 - 0,11 = 108,89 \text{ мм} - \text{в графу 13.}$$

Отже, розмір $A_{33ном}^{кор}$ – скоригований на величину 0,89 мм. Після цього значення S_{2cp} записуємо в графу 6 таблиці 2.4 – 108,89 мм.

Аналогічно проводимо розрахунки для інших операційних розмірів заготовки.

Після розрахунків операційних розмірів необхідно виконати перевірку забезпечення розмірів замикальних ланок: конструкторських розмірів S_i та мінімальних значень припусків Z_{ij} .

Наприклад, для конструкторського розміру S_1 :

$$S_1 = A_{31} = 400_{+0,4}^{+0,76}.$$

На кресленні деталі розмір S_1 становить:

$$S_1 = 400_{+0,4}^{+0,76}.$$

Таким чином, заданий конструкторський розмір забезпечується. Аналогічна перевірка за іншими конструкторськими розмірами S_i показала, що вони також забезпечуються відповідними технологічними допусками.

Перевірка щодо забезпечення мінімальних значень припусків також показала правильність виконаних розрахунків. Зокрема, для припуску Z_{41} :

$$Z_{31} = A_{21} - A_{31} = 401,3_{-0,4} - 400_{+0,4}^{+0,76} = 1,3_{-1,16}^{-0,4};$$

тобто, $Z_{31\min} = 1,3 - 1,16 = 0,14$ мм, що більше значення мінімального припуску з графі 2 таблиці 2.4 ($Z_{31}=0,1$ мм), отже, розрахунок виконано правильно. Правильність розрахунків показала перевірка щодо забезпечення інших значень мінімальних припусків.

2.4 Аналіз комплексної на обробному центрі з ЧПК операції 050

2.4.1 Аналіз схеми базування та закріплення заготовки

Згідно з завданням проаналізуємо схему базування на операцію 050 комплексну на обробному центрі з ЧПК (див. табл. 2.1). Згідно з базовою технологією зазначена операція реалізується як *свердлильна* 060 з використанням радіально-свердлильного верстата та попереднім розмічуванням оброблюваних отворів на операції 055 розмічувальній (див. табл. 1.2).

Оброблення поверхонь заготовки на верстаті з ЧПК дозволить усунути малопродуктивне розмічування, стабілізувати забезпечення технічних вимог на оброблення поверхонь, поліпшити умови праці робочого, підвищити продуктивність технологічного процесу.

Як зазначено в табл. 2.1, заготовку на операції 050 комплексній з ЧПК оброблюють в два установи.

Перелік переходів згідно з установом А:

1) свердлити 6 отворів $\varnothing 10,2^{+0,36}$ на глибину $26 \pm 0,26$ з дотриманням розміру $\varnothing 290 \pm 0,65$ і 2 отвори $\varnothing 10,2^{+0,36}$ на глибину $22 \pm 0,26$ з дотриманням розміру $\varnothing 450 \pm 0,775$;

2) зенкувати у 8 отворах фаски в розмір $1,6 \times 45^\circ$;

3) нарізати різь у 6 отворах М12-7Н на глибину $18 \pm 0,215$ і в 2 отворах М12-7Н на глибину $15 \pm 0,215$;

4) свердли́ти отвір $\varnothing 8^{+0,36}$ на глибину $140\pm 0,5$ з дотриманням розміру $\varnothing 290\pm 0,65$.

Установ Б:

1) свердли́ти 6 отворів $\varnothing 13,9^{+0,4}$ на глибину $34\pm 0,31$ з дотриманням розміру $\varnothing 295\pm 0,65$;

2) зенкувати в 6 отворах фаски в розмір $1,6\times 45^\circ$;

3) нарізати різь у 6 отворах М16-7Н на глибину $26\pm 0,26$.

Як відомо поверхні, що претендують на роль технологічних баз мають відповідати певним критеріям: вони повинні мати просту форму (плоску, циліндричну), бути досить розвинутими за площею (для плоских поверхонь) чи довжиною (для поверхонь обертання), бути досить точними та якісними, не заважати доступу різального інструменту.

На час реалізації операції найбільш розвиненими є циліндричні поверхні заготовки $\varnothing 325$, $\varnothing 340$ і $\varnothing 470\text{C}11$, циліндричні отвори $\varnothing 250\text{H}7$, $\varnothing 250^{+0,3}_{+0,6}$, $\varnothing 270\text{H}7$, $\varnothing 270^{+0,3}_{+0,6}$ а також торцеві поверхні за розміром 400с11. До цієї операції зазначені поверхні вже оброблені начисто. Точність поверхонь $\varnothing 325$ і $\varnothing 340$ після обточування відповідає ІТ12, з допуском 0,57 мм, допуск на $\varnothing 470$ виконаний за ІТ11 і дорівнює 0,4 мм; для циліндричних отворів $\varnothing 250\text{H}7$ і $\varnothing 270\text{H}7$ – точність відповідає ІТ7 з допуском 0,046 мм і 0,052 мм відповідно, а для $\varnothing 250^{+0,3}_{+0,6}$ і $\varnothing 270^{+0,3}_{+0,6}$ – ІТ10–12 з допуском 0,3 мм; відстань між торцевими поверхнями задано розміром 400с11 виконаним за ІТ11 (допуск становить 0,36 мм). Отже, як головну технологічну базу для установка А і Б беремо торці заготовки, через які будуть реалізовані установчі бази (див. рис. 2.4, 2.5). Вони позбавлять заготовку 3-х ступенів свободи – одного поступального руху вздовж осі Z і двох обертальних рухів навколо осей Y і X (див. табл. 2.5, 2.6). Зовнішні циліндричні поверхні при базуванні в призмах (або патроні) реалізують подвійну опорну базу. Вона позбавить заготовку 2-х ступенів свободи: двох поступальних рухів вздовж осей Y та X.

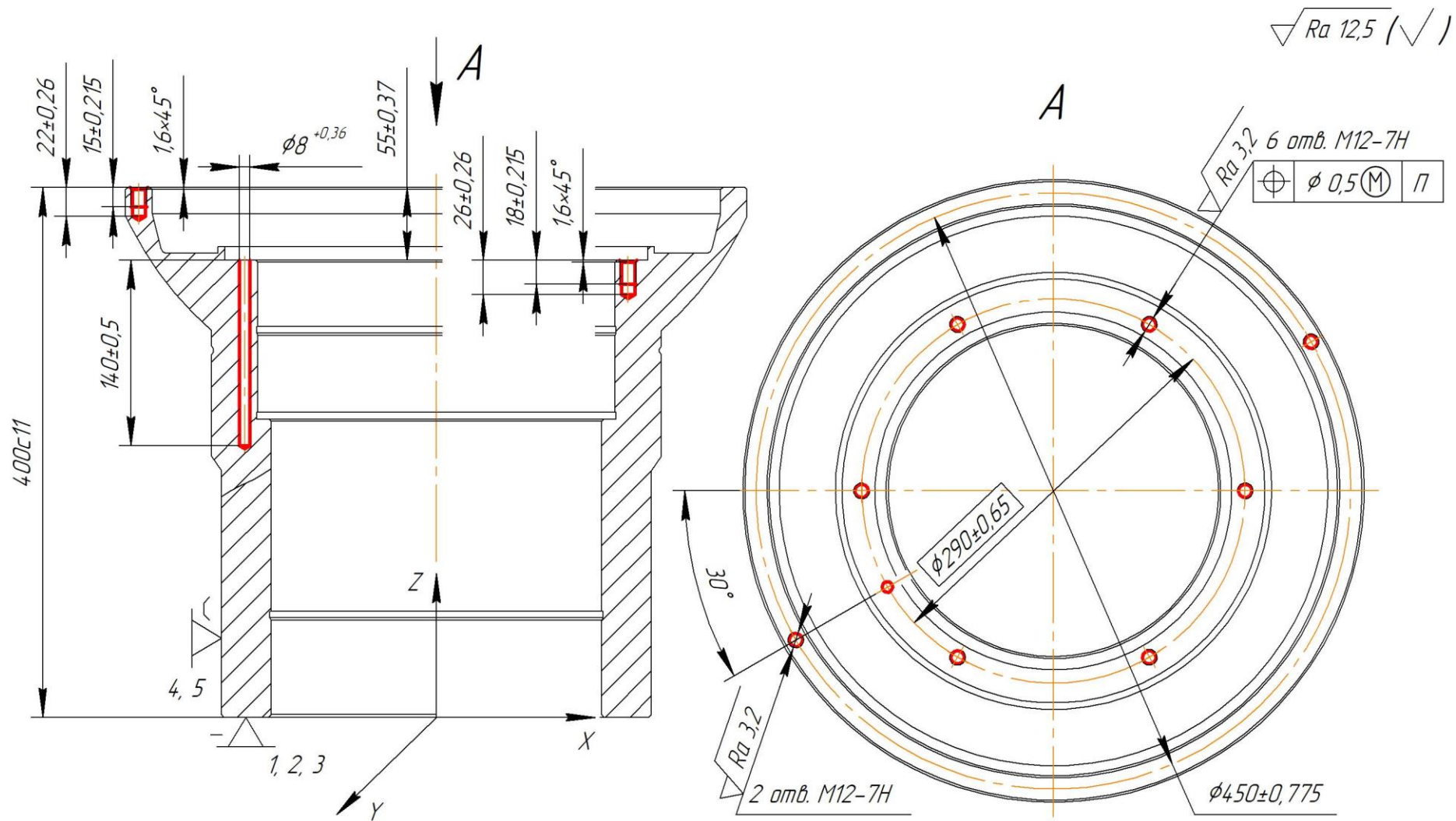


Рисунок 2.4 – Схема базування заготовки на операції 050 (установ А)

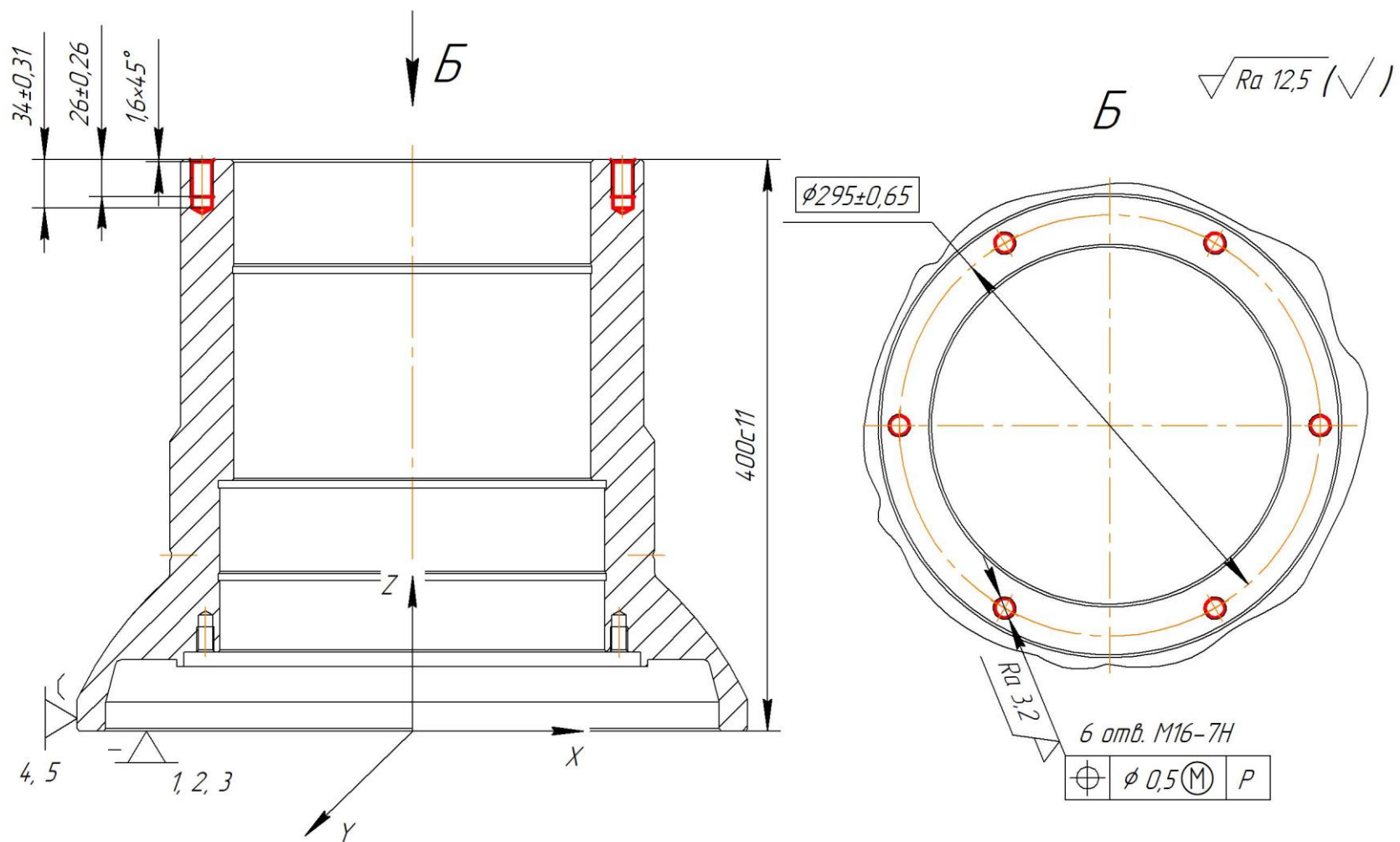


Рисунок 2.5 – Схема базуння заготовки на операції 050 (установ Б)

Отже, загалом заготовка буде позбавлена п'яти ступенів свободи, чого цілком достатньо для цієї операції, оскільки їй не потрібні кутові прив'язки. В результаті вакантним залишається обертання навколо осі Z.

Таблиця 2.5 – Таблиця відповідності

Зв'язки	Ступені вільності	Найменування баз
1, 2, 3	III, IV, V	Установча
4, 5	I, II	Подвійна опорна
6	VI	Вакансія

Таблиця 2.6 – Матриця зв'язків

	X	Y	Z	Найменування баз
<i>l</i>	0	0	1	Установча
<i>α</i>	1	1	0	
<i>l</i>	1	1	0	Подвійна опорна
<i>α</i>	0	0	0	
<i>l</i>	0	0	0	Вакансія
<i>α</i>	0	0	0	

За таких схем базування похибки базування на радіальні технологічні розміри відсутні. Це зокрема стосується міжцентрових діаметральних розмірів. Також відсутня похибка базування на діаметральні розміри отворів. Їх точність визначається точністю свердлів, зенківків і мітчиків, ступенем їх зношення тощо.

Похибки базування на осьові розміри (глибину отворів і нарізаних різьблень) дорівнюють допускам на розміри що з'єднують технологічні і вимірювальні бази.

Для установка А

$$\varepsilon_{6\ 15} = \varepsilon_{6\ 22} = T_{400c11} = 0,36 \text{ мм},$$

що менше ніж відповідні допуски: $T_{15} = 0,43 \text{ мм}$; $T_{22} = 0,52 \text{ мм}$ – це є прийнятним.

Для розмірів 18 мм, 26 мм і 140 мм похибки базування перевищують допуски на ці розміри ($T_{18} = 0,43 \text{ мм}$; $T_{26} = 0,52 \text{ мм}$; $T_{140} = 1 \text{ мм}$):

$$\varepsilon_{6\ 18} = \varepsilon_{6\ 26} = \varepsilon_{6\ 140} = T_{400c11} + T_{55} = 0,36 + 0,74 = 1,1 \text{ мм},$$

що є неприйнятним. Для оброблення таких отворів бажано застосовувати верстат з ЧПК з прив'язкою інструментів за верхнім торцем заготовки, від якого і задані осьові операційні розміри:

$$\varepsilon_{6\ 18} = \varepsilon_{6\ 26} = \varepsilon_{6\ 140} = 0 \text{ мм}.$$

Для установка Б

$$\varepsilon_{6\ 34} = \varepsilon_{6\ 26} = T_{400c11} = 0,36 \text{ мм},$$

що є прийнятним, оскільки величини похибок не перевищують величини відповідних допусків ($T_{34} = 0,62 \text{ мм}$; $T_{26} = 0,52 \text{ мм}$).

Отже, схеми базування заготовки, наведені на рис. 2.4 та 2.5 є прийнятними, оскільки дозволяють забезпечити вимоги робочого креслення щодо точності оброблюваних поверхонь.

2.4.2 Обґрунтування вибору металорізального устаткування

Згідно з базовою технологією на свердлильній операції використовується універсальний радіально-свердлильний верстат моделі 2М55. Аналіз показав, що верстат 2М55 за своїми характеристиками відповідає одиничному-дрібносерійному типам виробництва. Методи оброблення поверхонь визначені з урахуванням форми поверхонь, їх точності та шорсткості згідно з робочим кресленням деталі. Водночас застосування верстата 2М55 для оброблення отворів вимагає зокрема попереднього розмічування, що характеризується низькою продуктивністю та потребує висококваліфікованої ручної праці. Це зменшує продуктивність операції та збільшує собівартість виробництва.

На противагу морально та фізично застарілому верстату 2М55 для умов серійного виробництва пропонується вертикальний фрезерно-свердлильно-розточувальний верстат типу обробний центр з ЧПК моделі V1100 (Leaderway) [8]. Верстат V1100 комплектується висувним шпинделем з конічним отвором ВТ40, робочим столом 1350×600 мм. Максимальна частота обертання шпинделя становить 10 000 об/хв, магазин інструментів з системою автоматичної заміни розрахований на 20 позицій, точність позиціонування робочих органів верстата за

віссю X становить 0,015 мм, за віссю Y – 0,015 мм, потужність електродвигуна приводу головного руху становить 15/18,5 кВт.

Верстат V1100 дозволяє вести високопродуктивне оброблення поверхонь заготовки з попереднім налаштуванням методом автоматичного отримання точності розмірів, та незалежно від кваліфікації робочого. В такому разі усувається необхідність у малопродуктивному ручному управлінні верстатом, усувається попереднє ручне розмічування, скорочується тривалість та знижується собівартість оброблення заготовки.

2.4.3 Обґрунтування вибору технологічної оснастки

Для базування та закріплення заготовки з урахуванням серійного типу виробництва, в рамках якого планується виготовляти корпус підшипників, в перспективному технологічному процесі беремо універсальні безналагоджувальні пристрої (УБП), що відносять до нерозбірних верстатних пристроїв багаторазового застосування. Згідно з пропонованою схемою базування заготовки на операції будемо використовувати самоцентрувальні лещата. Для підвищення ефективності використання верстата з ЧПК та операції загалом в лещатах пропонується використовувати механізований (пневматичний) привод закріплення заготовки. Такі пристрої зазвичай експлуатують без доопрацювання, див. табл. 2.7.

Основними факторами, що визначають вибір різального інструменту, є технологічні методи оброблення поверхонь та оброблюваний матеріал.

За конструктивними параметрами вибиралися універсальні стандартизовані різальні інструменти для верстатів з ЧПК. Як допоміжний інструмент для установлення інструменту з циліндричними хвостовиком використовувався цанговий патрон 191113040 ТУ 2-035-986-85, для інструменту з конічним хвостовиком використовувалися втулки перехідні 191831 072 ТУ 2-035-978-85; для установлення мітчиків – утримувачі мітчиків 191221030А/040 ТУ 2-035-975-84 та 191221030А/060 ТУ 2-035-975-84.

Таблиця 2.7 – Операція 050: відомість технологічної оснастки [11]

Найменування операції	Верстатний пристрій	Різальний інструмент	Вимірювальний інструмент
1	2	3	4
Комплексна на обробному центрі з ЧПК	Лещата призматичні самоцентрувальні з пневмоприводом	Свердло 035-2300-1275 ОСТ 2И20-1-80, Р6М5 ГОСТ 19265-73; свердло 035-2300-1308 ОСТ 2И20-1-80, Р6М5 ГОСТ 19265-73; свердло 2301-0385 ГОСТ 2092-77, Р6М5 ГОСТ 19265-73; зенківка 2353-0122 ГОСТ 14953-74; Р6М5 ГОСТ 19265-73; мітчик 035-2620-0563 ОСТ 2И52-1-74, Р6М5 ГОСТ 19265-73; мітчик 035-2620-0548 ОСТ 2И52-1-74, Р6М5 ГОСТ 19265-73	Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1 ДСТУ EN ISO 13385-1:2018; штангенциркуль ШЦ-III-320-0,1 ДСТУ EN ISO 13385-1:2018; штангенциркуль ШЦ-III-630-0,1 ДСТУ EN ISO 13385-1:2018; пробка різьбова М12-7Н ПР-НЕ ГОСТ 17756-72; пробка різьбова М16-7Н ПР-НЕ ГОСТ 17756-72

При виборі контрольно-вимірювальних інструментів в умовах серійного виробництва перевагу слід віддати універсальним шкальним інструментам, зокрема, штангенциркулям. Для контролю шорсткості будемо використовувати зразки шорсткості ГОСТ 9378-93.

2.4.4 Визначення режимів різання та технічних норм часу

Режими різання на операцію визначимо з використанням калькулятора режимів різання Sandvik Coromant.

Як приклад розглянемо первинні дані для розрахунку режимів різання на перехід свердління.

Поверхня оброблення: отвір циліндричний (6 отв.) $\varnothing 13,9$ мм під нарізання різі М16-7Н.

Матеріал – сталь 25Л ГОСТ 977-88 ($\sigma_B = 450$ МПа).

Діаметр свердління – $D = 13,9$ мм.

Глибина свердління – $l = 34$ мм.

Шорсткість поверхні отвору – $6,3$ мкм R_a .

Металорізальне устаткування – вертикальний верстат типу обробний центр з ЧПК V1100 (див. п. 2.4.2 цієї роботи).

Характеристика верстатного пристрою.

Заготовка встановлюється в самоцентрувальних лещатах з призматичними губками, з пневмоприводом.

Характеристика різального інструменту.

Свердло 035-2300-1308 ОСТ 2И20-1-80.

Геометричні параметри різальної частини свердла: $2\varphi_1 = 118^\circ$; $\alpha = 11^\circ$.

Матеріал різальної частини свердла: сталь Р6М5 ГОСТ 19265-73.

Діаметр свердла: 13,9 мм.

В результаті були визначені режими різання на всі переходи операції, див. табл. 2.8.

Таблиця 2.8 – Операція 050: режими різання за переходами

№ пере- хода	Зміст переходу	Елементи режимів різання						
		D _{обр} , мм	L, мм	i	t, мм	S _п , мм/об	n, об/хв	V, м/хв
1	2	3	4	5	6	7	8	9
А.1	1. Свердлити 6 отв. Ø10,2×26.	10,2;	26;	6;	5,1;	0,1;	500;	16;
	2. Свердлити 2 отв. Ø10,2×22	10,2	22	2	5,1	0,1	500	16
А.2	Зенкувати у 8 отв. фаски 1,6×45°	13,4	1,6	8	1,6	0,1	500	21
А.3	1. Нарізати різь у 6 отв. M12-7H×18.	12;	18;	6;	-	1,75	180;	6,8;
	2. Нарізати різь у 2 отв. M12-7H×15	12	15	2	-	1,75	180	6,8
А.4	1. Свердлити отв. Ø8×140	8	140	1×4	4	0,1	500	12,6
Б.1	1. Свердлити 6 отв. Ø13,9 на глиб. 34 мм	13,9	34	6	6,95	0,14	500	21,8
Б.2	1. Зенкувати у 6 отв. Ø13,9 фаски 1,6×45°	17,1	1,6	6	1,6	0,1	500	26,9
Б.3	1. Нарізати різь у 6 отв. M16-7H	16	26	6	-	2,0	180	9

Основний час за переходами операції: $t_{0A.1} = 4,64$ хв; $t_{0A.2} = 0,9$ хв;
 $t_{0A.3} = 0,54$ хв; $t_{0A.4} = 11,52$ хв; $t_{0B.1} = 3,25$ хв; $t_{0B.2} = 0,67$ хв; $t_{0B.3} = 0,5$ хв.

Технічні норми часу на операцію визначимо згідно з методикою [13].

Отже, основний час на операцію становить $t_0 = 22,03$ хв.

Допоміжний час на операцію становить

- установлення/зняття заготовки

$$t_{уст} = 3,5 \cdot (1+0,8) = 6,3 \text{ хв};$$

- керування верстатом

$$t_{пр} = 0,11 \cdot 14 + 0,05 \cdot 14 + 0,1 \cdot 14 + 0,28 = 2,66 \text{ хв};$$

- контроль та вимірювання

$$t_{вим} = 0,45 \cdot 14 + 0,12 \cdot 15 + 0,1 \cdot 14 + 0,13 = 9,63 \text{ хв};$$

$$t_d = 6,3 + 2,66 + 9,63 = 18,59 \text{ хв.}$$

Час на обслуговування робочого місця на особисті потреби:

$$t_{обс} + t_{вдп} = (22,03 + 18,59) \cdot (4 + 4) / 100 = 3,25 \text{ хв.}$$

Штучний час на операцію становить

$$t_{шт} = 22,03 + 18,59 + 3,25 = 43,87 \text{ хв.}$$

Штучно-калькуляційний час на операцію з урахуванням підготовчо-завершального часу на операцію $t_{п.з} = 21$ хв, становить

$$t_{шт.к} = 43,87 + 21 / 24 = 44,75 \text{ хв.}$$

2.5 Проектування верстатного пристрою

Під час аналізу базового технологічного процесу виготовлення корпусу підшипників було зроблено висновок про те, що використовуване металорізальне устаткування є морально та фізично застарілим. Водночас було запропоновано ширше використовувати верстати з ЧПК (обробні центри з ЧПК). Так, для оброблення гладких та різьбових отворів на операції 050 було запропоновано використовувати вертикальний фрезерно-свердлильно-розточувальний верстат типу обробний центр з ЧПК моделі V1100. Для підвищення ефективності використання такого верстата для базування та закріплення заготовки бажано використовувати верстатний пристрій з механізованим приводом закріплення заготовки. В результаті пропонується для установлення заготовки на операції 050 комплексній на обробному центрі з ЧПК згідно з прийнятою в п. 2.4.1 схемою базування використовувати як верстатний пристрій лещата самоцентрувальні з пневматичним приводом закріплення. Це дозволить встановлювати заготовку в спеціально підготовлені установчі поверхні пристрою. Використання механізованого приводу дозволить зменшити допоміжний час на закріплення/розкріплення заготовки, поліпшить умови роботи робочого. Водночас це сприяє стабілізації забезпечення точності операційних розмірів. Кваліфікація робочого знижується. Продуктивність операції підвищується. Собівартість виробництва знижується.

Точність діаметрів оброблюваних отворів забезпечується відповідно до IT13–14 (допуски становлять відповідно 270 мкм і 430 мкм). Згідно з IT14 задано глибину отвору $T_{26} = 520$ мкм, відстань між осями отворів $T_{\varnothing 450} = 1550$ мкм.

Кресленням деталі не регламентовано точність форми оброблюваних поверхонь: беремо її в межах відповідних допусків на операційні розміри. Зокрема, відхилення від циліндричності отворів становить $T_{\varphi} = 80$ мкм, що відповідає 12 ступеню точності.

Кресленням деталі також не регламентовано точність взаємного розташування поверхонь отворів. Беремо її як допуск перпендикулярності в межах допуску на міжосьову відстань: $T_{\perp} = 800$ мкм.

Шорсткість поверхонь отворів становить 12,5 мкм за критерієм Ra.

На цю операцію заготовка поступає після півчистового обточування. Маса заготовки становить 131 кг.

У п. 2.4.1 цієї роботи обґрунтовано вибір схеми базування заготовки на операції 050, див. рис. 2.4, 2.5 При цьому технологічні бази будуть суміщені з вимірювальними та конструкторськими базами, що усуває як такі похибки базування та забезпечує необхідну точність оброблених поверхонь заготовки.

Згідно з прийнятою схемою базування заготовку позбавлено 5-ти ступенів вільності (реалізується установча та подвійна опорна технологічні бази). На заготовку накладено дев'ять односторонніх зв'язків. Всі зв'язки окрім z' є неповними.

Щоб заготовка-пристрій стала врівноваженою під час оброблення заготовки, останню необхідно позбавити можливості переміщатися за координатами z' (поступальний рух вздовж осі z), ω_z та ω'_z (круговий рух навколо осі z за та проти годинникової стрілки).

Графічна схема структури збурювальних сил у взаємозв'язку з прийнятою схемою базування (див. рис. 2.6) дозволяє проаналізувати дію збурювальних та врівноважувальних сил, що діють в системі заготовка-пристрій. Осьова складова сили різання P_o , що є максимальною під час свердління, представляє систему збурювальних сил та врівноважується реакцією опори R_z' . Інші складові поля збурювальних сил вимагають дії додаткових сил – закріплення. За умови використання призматичних установчих елементів пристрою поле врівноважувальних сил будемо таким, див. рис. 2.7.

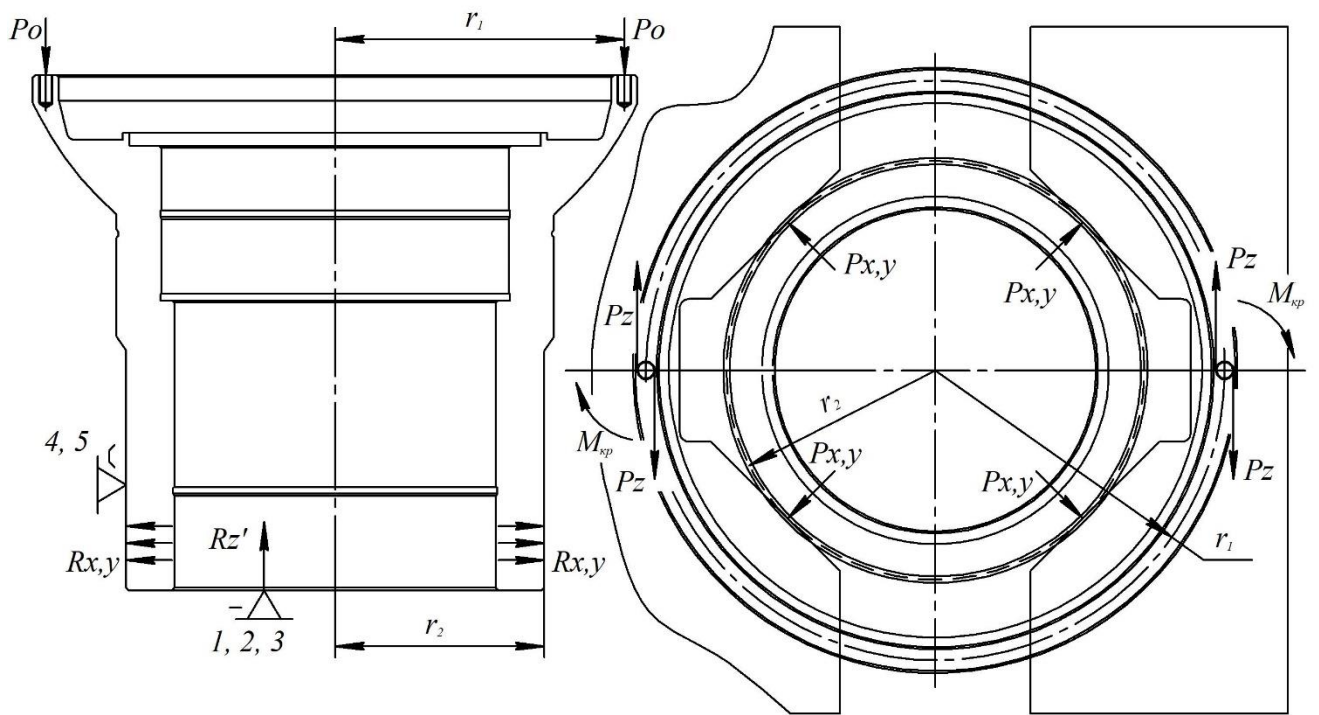


Рисунок 2.6 – Структура поля сил збурення

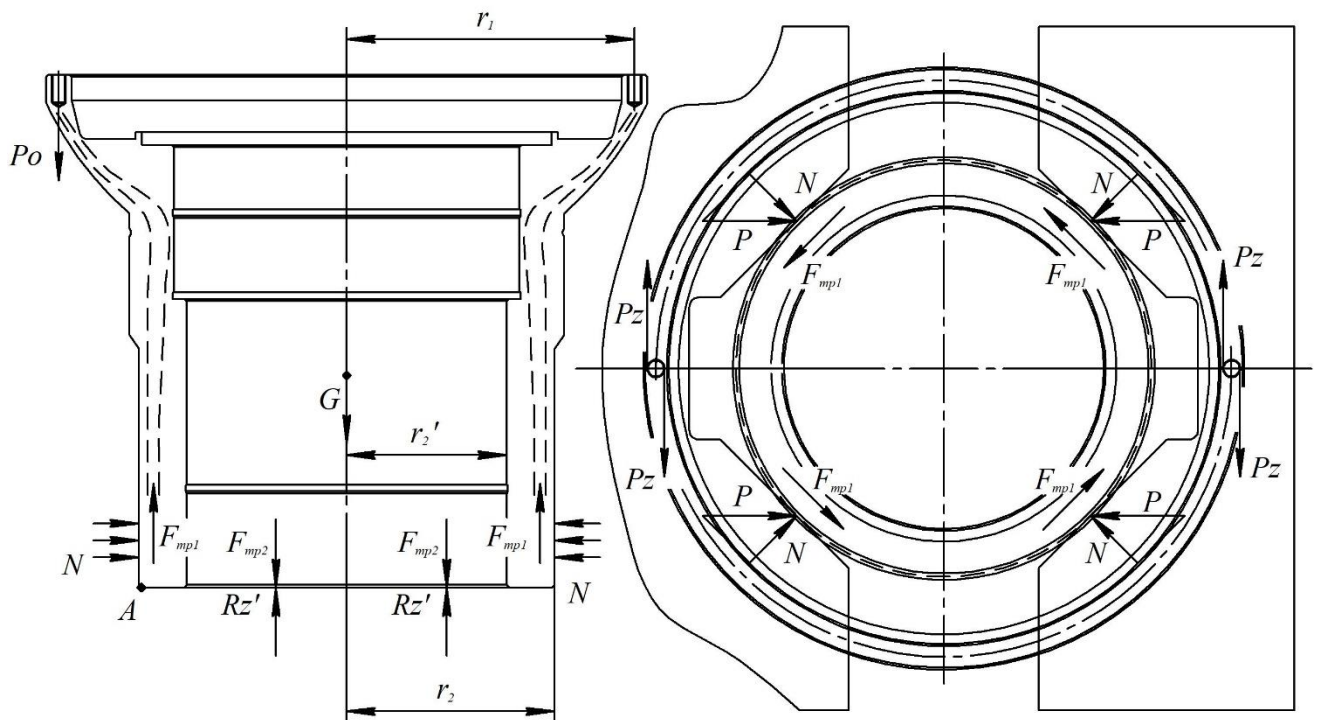


Рисунок 2.7 – Структура поля сил врівноваження

Під час свердління отворів у верхньому торці заготовки напрямок дії осьової складової сили різання P_0 заданий вздовж осі оброблюваних отворів на

опору, див. рис. 2.6 і 2.7, розрахунок зусилля закріплення заготовки з умови не відриву її від опори робити не будемо.

Розрахунок на перекидання заготовки також не будемо робити, оскільки заготовка може перекидатися навколо точки контакту А (див. рис. 2.7). Водночас протилежний край заготовки притискається протилежною губкою. Це запобігає перекиданню заготовки. Цьому також сприяє велика вага заготовки:

$$P_o \cdot (r_1 - r_2) < G_{\text{заг}} \cdot r_2,$$

де P_o – осьова сила різання при свердлінні отвору найбільшого діаметра на установі А $\varnothing 10,2$;

$r_1 = 225$ мм, $r_2 = 162,5$ мм – радіуси прикладання сил різання й перекидання;
 $G_{\text{заг}} = 1310$ Н – вага заготовки.

Осьова складова сили свердління за попередніми розрахунками становить 941 Н.

Мінімальна вага заготовки, що перешкоджає її перекиданню, становить

$$G_{\text{заг}} = \frac{P_o \cdot (r_1 - r_2)}{r_2} = \frac{941 \cdot (225 - 162,5)}{162,5} = 362 \text{ Н.}$$

Водночас вага заготовки є набагато більшою (1310 Н), тобто заготовка не перекинеться навіть без прикладання зусиль закріплення.

Отже, величину сумарного зусилля закріплення заготовки слід визначити з умови непровертання заготовки на опорних поверхнях призм від складової сили різання P_z , заданої тангенціально і з урахуванням ваги заготовки. Складова P_z визначається з моменту різання, що виникає під час свердління.

$$M_{\text{тр}} \geq M_{\text{кр}},$$

або

$$M_{\text{тр}} = K_{\text{зап}} \cdot M_{\text{кр}},$$

де $M_{\text{тр}}$ – момент тертя від дії сил закріплення та ваги заготовки;

$M_{\text{кр}}$ – крутний момент від сил різання;

$K_{\text{зап}}$ – коефіцієнт запасу.

Отже, нерухомість заготовки забезпечується прикладанням зусилля закріплення: заготовка не має конструктивних елементів, які б могли

компенсувати круговий рух через реакцію опори. Недоліком такої схеми є значний енергетичний рівень, оскільки врівноваження здійснюється непрямим методом – силами тертя. З іншого боку це компенсується відносною простотою силоутворювального механізму.

В такому разі

$$M_{\text{тр}} = F_{\text{тр}1} \cdot r_2 + F_{\text{тр}2} \cdot r_2^*,$$

- де $F_{\text{тр}1}$ – сила тертя від сил закріплення;
 r_2 – радіус прикладання сили тертя;
 $F_{\text{тр}2}$ – сила тертя від ваги заготовки;
 r_2^* – середній радіус прикладання ваги заготовки.

$$F_{\text{тр}1} = N \cdot f,$$

- де N – нормальна складова сили закріплення;
 f – коефіцієнт тертя.

$$N = P \cdot \sin(\alpha/2),$$

- де P – сила закріплення;
 α – кут призми.

$$F_{\text{тр}2} = G_{\text{заг}} \cdot f,$$

- де $G_{\text{заг}}$ – вес заготовки.

$$M_{\text{тр}} = P \cdot r_2 \cdot f \cdot \sin(\alpha/2) + G_{\text{заг}} \cdot f \cdot r_2^*.$$

$$M_{\text{кр}} = P_z \cdot r_1,$$

- де P_z – тангенціальна складова сили різання, що виникає під час свердління;
 r_1 – максимальний радіус прикладання складової P_z .

В результаті маємо формулу для визначення сили закріплення заготовки:

$$P = \frac{K_{\text{зан}} \cdot P_z \cdot r_1 - G_{\text{заг}} \cdot f \cdot r_2^*}{r_2 \cdot f \cdot \sin(\alpha / 2)}.$$

За попередніми розрахунками беремо коефіцієнт запасу $K_{\text{зап}} = 2,6$.

Якщо момент різання M_p під час свердління отвору 10,2 мм становить 3,9 Н · м, маємо $P_z = 759$ Н.

Якщо $r_1 = 225$ мм, $r_2 = 162,5$ мм, $r_2^* = 143,75$ мм, коефіцієнт тертя $f = 0,3$, кут $\alpha = 90^\circ$:

$$P = \frac{2,6 \cdot 759 \cdot 225 - 1310 \cdot 0,3 \cdot 143,75}{162,5 \cdot 0,3 \cdot \sin(90 / 2)} = 11244 \text{ Н.}$$

Пропонований силовий розрахунок враховує найгірші умови різання, коли можлива поломка свердла і в розрахунку братиме крутний момент від сили P_z помножений на радіус щодо центру розвороту заготовки r_1 . Якщо взяти $M_{кр}$ для нормальних умов свердління, то заготовку не потрібно закріплювати, оскільки її вага є дуже великою і остання залишатиметься нерухомою.

Зусилля на штоку пневмоприводу визначимо з урахуванням характеристик важільного передавального пристрою, див. рис. 2.8:

$$Q = P \cdot l_1 / l_2,$$

де l_1, l_2 – плечі важеля передавального пристрою лещат.

При розмірах плечей $l_1 = 76$ мм, $l_2 = 76$ мм, маємо:

$$Q = 11244 \cdot 76 / 76 = 11244 \text{ Н.}$$

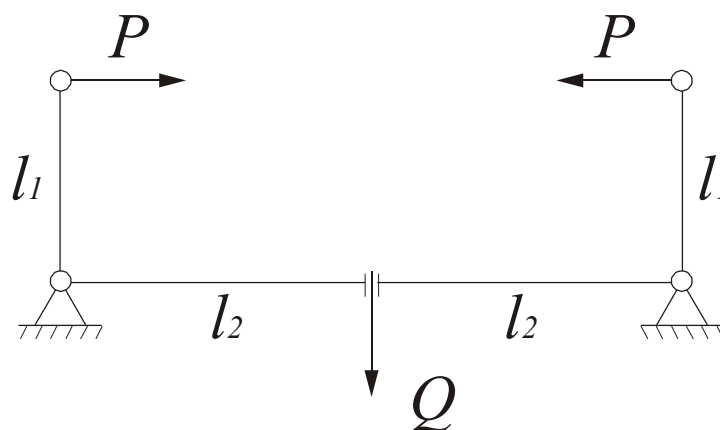


Рисунок 2.8 – Схема дії сил на важелях лещат

Згідно з [12] беремо стандартний діаметр пневмоциліндра $D = 250$ мм, що забезпечує зусилля на штоку $Q = 12,4$ кН.

До розрахункових параметрів, що більшою мірою впливають на забезпечення регламентованих робочим кресленням деталі допусків, можна віднести відхилення від перпендикулярності робочих поверхонь призм щодо основи корпусу верстатного пристрою. Цей параметр є однорідним з похибкою, обумовленою в деталі взаємним розташуванням поверхонь – допуском на відхилення від перпендикулярності осей поверхонь отворів щодо торця заготовки $T_{\perp} = 800$ мкм. В такому разі допустиму похибку пристрою визначимо за формулою [12]:

$$E_{\text{пр}} = T - K \sqrt{(K_1 \cdot E_{\sigma})^2 + E_3^2 + E_y^2 + E_{\text{зн}}^2 + E_n^2 + (K_2 \cdot \omega)^2},$$

де $K = 1,2$;

$K_1 = 1,0$;

$E_{\sigma} = 0$ мкм – похибка базування;

$E_3 = 10$ мкм – похибка закріплення заготовки;

$E_y = 50$ мкм – похибка установлення верстатного пристрою на столі верстата;

$E_{\text{зн}} = 20$ мкм – похибка від зношення установчих елементів верстатного пристрою;

$E_n = 20$ мкм – похибка установлення й прекоосу інструмента на верстаті;

$K_2 = 0,6$;

$\omega = 200$ мкм – середня економічна точність оброблення поверхні [2].

В такому разі маємо $E_{\text{пр}} = 596$ мкм.

Беремо допуск величину відхилення від перпендикулярності не більше 590 мкм. Похибка в таких межах виникає як результат складання частинних похибок взаємного розміщення поверхонь: одержаний допуск розділимо за формуючими його елементами:

1) відхилення від перпендикулярності робочих поверхонь призм щодо їх напрямних – 250 мкм;

2) відхилення від паралельності поверхонь направляючих призм щодо основи пристрою – 340 мкм.

Опис будови пристрою.

Спроектований пристрій складається з основи 13, у верхній частині якої з можливістю повертання навколо своєї осі встановлений корпус 10. Всередині корпусу 10 назустріч на одній осі встановлено гвинти 6 і 7 з правим і лівим різьбленнями, відповідно, та з можливістю осьових переміщень. На гвинтах встановлені гайки 5 з рухомими губками 8. Останні ковзають по напрямних корпусу 10. Для запобігання перекиданню губок до нижньої площини останніх за допомогою болтів 21 приєднані рейки 17, що охоплюють напрямні знизу. На губках 8 гвинтами 26 закріплені призми 16. У нижній частині основи 13 лежат розміщений пневмоциліндр, що закривається кришкою 11. Усередині циліндра встановлений поршень 15 з ущільнювальними кільцями 27. Шток ущільнюється манжетою 29. У верхній частині штока розміщений прямокутний паз, в який входять плечі двох важелів 1, встановлених на осях 2. Протилежні плечі важелів 1 мають форму «вилка», які охоплюють циліндричні кільцеві канавки гвинтів 6 і 7, та передають їм синхронні осьові переміщення, забезпечуючи можливість самоцентрувати заготовку. В нижній частині основи 13 гвинтами 24 зафіксовані дві призматичні шпонки 30, через які верстатний пристрій базується в Т-подібних пазах столу верстата.

Послідовність роботи пристрою.

Заготовка встановлюється нижнім торцем на робочу площину корпусу 10 та циліндричною поверхнею $\varnothing 325h12$ між установчими поверхнями призм 16. У штокову порожнину пневмоциліндра через отвір та штуцер подається стисле повітря, що переміщає поршень-шток 15 і плечі важелів 1. Важелі повертаються на осях 2, зводячи назустріч вилкоподібні частини своїх плечей. Водночас назустріч один до одного сходяться два гвинти 6 і 7, які переміщують назустріч губки 8 та призми 16. Призми вступають в контакт з циліндричною поверхнею заготовки $\varnothing 325h12$ – відбувається самоцентрування та закріплення заготовки.

2.6 Висновок

1. На основі зауважень сформульованих в п. 1.5 та 1.6 цієї роботи, були запропоновані рішення, спрямовані на підвищення ефективності технологічного процесу виготовлення корпусу підшипників. Так, широке використання верстатів та обробних центрів з ЧПК, верстатних пристроїв з механізованими приводами закріплення заготовки, усунення операцій ручного розмічування, впровадження процесу суперфінішування замість малопродуктивного полірування, дозволяє підвищити продуктивність та знизити собівартість виробництва загалом, поліпшити умови праці робочих, стабілізувати забезпечення технічних вимог на виготовлення деталі, регламентованих робочим кресленням останньої.

2. Для підвищення ефективності перерозподілу припусків та стабілізації точності операційних розмірів в роботі виконано розмірний аналіз на оброблення поверхні обертання – циліндричного отвору діаметром 250H7 та розмірний аналіз технологічного процесу для розмірів, заданих в осьовому напрямку.

3. Згідно з завданням детально проаналізовано структуру та параметри операції комплексної з ЧПК 050: виконано обґрунтування вибору схем базування та закріплення заготовки, металорізальних верстатів, технологічної оснастки, режимів різання та технічних норм часу.

4. Для підвищення ефективності використання горизонтального обробного центра з ЧПК моделі V1100, запропонованого для використання на операції 050 та операції загалом, було спроектовано самоцентрувальні лещата з механізованим приводом закріплення заготовки. Для перевірки проєктних рішень пропонується провести додаткові дослідження запропонованої конструкції лещат, зокрема методами статичного аналізу та топологічної оптимізації.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКЦІЇ ВЕРСТАТНОГО ПРИСТРОЮ

3.1 Мета та методика дослідження

Технологічна обробна система (ТОС) складається з таких основних компонентів: верстат, верстатний пристрій, різальний інструмент, заготовка. Взаємодія цих компонентів та замикання системи через процес оброблення дозволяють забезпечити формування поверхонь деталі із дотриманням відповідних вимог точності розмірів, форми та взаємного розміщення поверхонь, їх шорсткості.

Верстатний пристрій є ключовим компонентом ТОС та виконує функцію проміжної ланки між верстатом та заготовкою через базування та закріплення останньої. У зв'язку з розширенням номенклатури виробів, оброблюваних на металорізальних верстатах, зростає роль верстатних пристроїв, які виконують функцію адаптера між відносно простими установчими поверхнями верстатів та різноманітними та часто складними за конфігурацією виробами. Водночас слід зауважити, що на цей час у сфері проектування верстатних пристроїв накопичений великий досвід. Наявна велика кількість наукових досліджень [13–17] та методичних рекомендацій щодо проектування різноманітних універсальних, гнучких та спеціальних верстатних пристроїв. Не дивлячись на це, проектування верстатних пристроїв залишається складним багатокритеріальним міждисциплінарним завданням, що потребує від інженера-технолога певного досвіду. Часто проектні рішення приймаються інтуїтивно та потребують ретельної перевірки для забезпечення заданих експлуатаційних характеристик та показників надійності.

Отже, метою дослідження в рамках цієї роботи є перевірка прийнятих в п. 2.5 проектних рішень та оптимізація конструкції пропонованого верстатного пристрою – самоцентрувальних лещат з пневматичним приводом закріплення заготовки.

Відомо, що під час оброблення на верстаті заготовка та система «заготовка-пристрій» загалом сприймають певні зусилля з боку процесу різання. Для забезпечення надійного положення заготовки попередньо зорієнтованої згідно з прийнятою схемою базування, до неї прикладаються певні зусилля закріплення. Все це обумовлює складний характер силової взаємодії в системі «заготовка-пристрій» та необхідність перевірки прийнятих проєктних рішень зокрема методом статичного аналізу [18]. Метою останнього є оцінювання напруженого стану досліджуваної конструкції, яка перебуває під дією не змінюваних за часом (статичних) силових впливів. Подібне оцінювання напруженого стану зазвичай виконується з метою перевірки прийнятих проєктних рішень за умовою міцності. Основними результатами статичного аналізу є поля переміщень елементів конструкції в розрахункових точках, поля відносних деформацій та поля компонентів напружень.

Останнім часом на перший план в сфері проєктування виробів машинобудівної галузі виходить поняття матеріалоемкості виробу, яка визначається як частка витрат матеріальних ресурсів, зокрема, основних і допоміжних матеріалів, на виготовлення одиниці продукції у загальних витратах. За аналогією до відомого визначення матеріалоемкості конструкції верстату (металоемкості), матеріалоемкість виробу визначається кількістю металу, що витрачається на одиницю корисної роботи. Іншими словами, чим менше матеріалу використовується для виготовлення виробу, зокрема, верстатного пристрою, за інших рівних умов, тим більш ефективною є його конструкція. В контексті матеріалоемкості на допомогу сучасному конструктору приходять метод топологічної оптимізації [19]. Алгоритм топологічної оптимізації знаходить найкращий розподіл матеріалу в межах заданих об'єму, мети та системи обмежень. Він бере цілісний об'єм матеріалу довільної форми і поступово видаляє його частину, при цьому максимізуючи або мінімізуючи такі цільові параметри, як маса, переміщення або податливість, водночас забезпечуючи відповідність заданим вимогам і дотримання системи обмежень на максимальне напруження або переміщення, що допускаються.

Алгоритми статичного аналізу та топологічної оптимізації є досить складними та вимагають довготривалих розрахунків, що практично унеможливує використання аналітичних рішень. Тут на допомогу приходять сучасні системи інженерного аналізу (CAE), які дозволяють автоматизувати розрахунок моделей, зробити його відносно швидким, а результати представити в наочній формі через відповідні епюри. Серед великої кількості сучасних систем інженерного аналізу на особливу увагу заслуговує програмний комплекс Ansys Workbench [20], до складу якого входять модулі статичного аналізу (Static Structural) та топологічної оптимізації (Structure Optimization). Ansys Workbench характеризується комплексністю рішень. Отже, для розрахунку та дослідження моделей зазначеними методами пропонується використовувати саме пакет Ansys Workbench.

3.2 Статичний аналіз конструкції системи «заготовка-пристрій»

Метою статичного аналізу конструкції пропонованого верстатного пристрою (лещат) є перевірка прийнятих проєктних рішень та пошук слабких місць в аспекті перевищення допустимих величин внутрішніх напружень матеріалу та переміщень компонентів.

Так, перевищення допустимої величини внутрішніх напружень в матеріалі конструкції пристрою є недопустимим. Зазвичай за допустиму величину внутрішніх напружень беруть величину межі текучості матеріалу, яка для сталі марки 40 (40X) становить 250 МПа.

Для оцінювання рівня внутрішніх напружень в матеріалі компонентів верстатного пристрою скористуємося розрахунковим модулем Static Structural Ansys Workbench. Для цього по-перше необхідно розробити твердотільну модель окремих компонентів верстатного пристрою та заготовки, та складальну модель системи «заготовка-пристрій». До складальної моделі системи «заготовка-пристрій» повинні увійти лише ті компоненти, що беруть безпосередню участь у силовій взаємодії системи, тобто такі, що задають чи передають силові збурення (див. рис. 3.1). Це робить зокрема для того, щоб зменшити час розрахунку моделі

через зменшення кількості розрахункових компонентів. До складальної моделі не будемо включати основу верстатного пристрою, кришку циліндра та дрібні елементи типу шпонки, гвинти, гайки тощо.

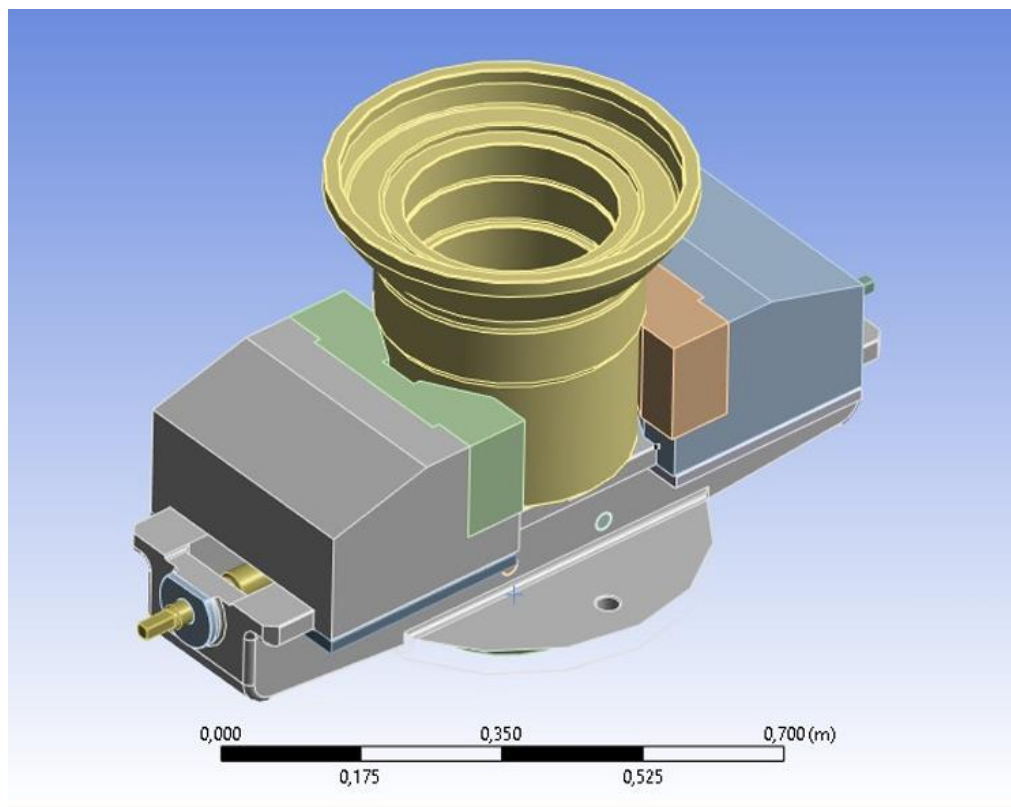


Рисунок 3.1 – Твердотальна складальна модель системи «заготовка-пристрій»

Важливим питанням в контексті статичного аналізу є вибір матеріалів компонентів моделі та їх фізико-механічних властивостей. В рамках нашого дослідження для всіх компонентів моделі беремо матеріал – конструкційна сталь, який використовується в Ansys Workbench за замовчуванням. Цей матеріал за своїми властивостями відповідає маркам сталі 30, 40, 40X: межа міцності на розрив – 460 МПа, межа текучості – 250 МПа, модуль пружності Юнга – $2 \cdot 10^5$ МПа.

Для підвищення адекватності результатів розрахунку моделі в рамках статичного аналізу обов'язковим є опис властивостей взаємодії спряжених поверхонь компонентів моделі. Так, для спряжених поверхонь пари «важіль-

вісь» було задано характеристику взаємодії «тертя ковзання» (Friction) з коефіцієнтом тертя 0,1 (див. рис. 3.2).

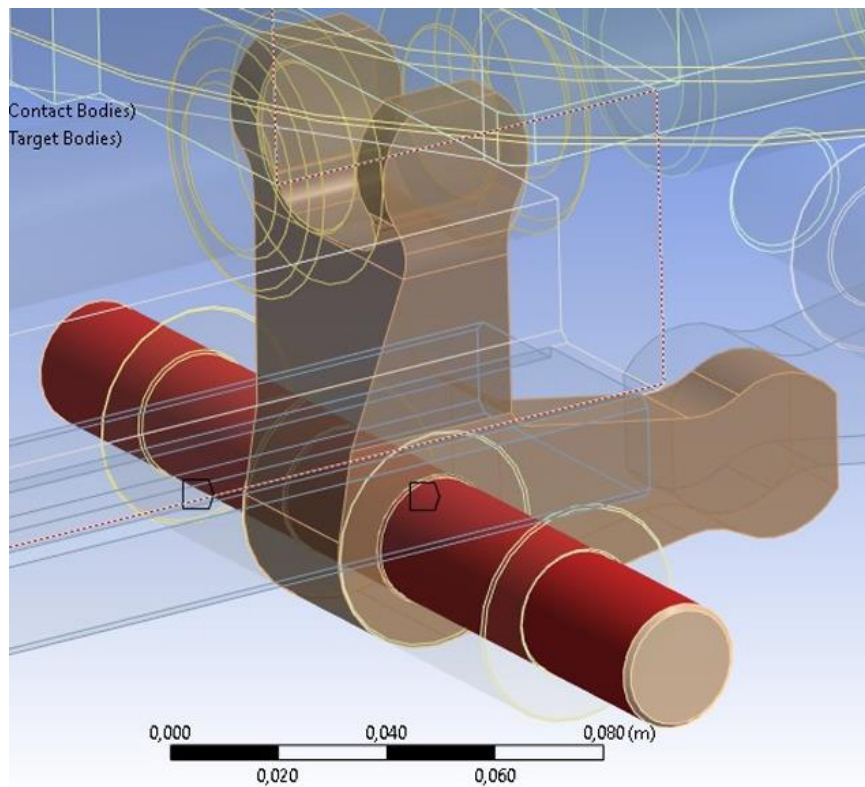


Рисунок 3.2 – Взаємодія спряжених поверхонь пари «важіль-вісь»

Для взаємодії пар «важіль-втулка» (див. рис. 3.3), «важіль-важіль» (див. рис. 3.4) було задано характеристику взаємодії «без тертя» (Frictionless).

Для спряжених поверхонь пари «важіль-шток» було задано характеристику взаємодії «тертя ковзання» (Friction) з коефіцієнтом тертя 0,05 (див. рис. 3.2).

Важливим етапом підготовки моделі до розрахунку є побудова скінченно-елементної сітки. Завелика кількість скінченних елементів знижує продуктивність розрахунку моделі, замала – знижує точність результатів розрахунку. В нашому дослідженні побудуємо сітку з характеристиками за замовчуванням: метод побудови сітки – адаптований автоматичний, загальна кількість елементів – 125669, мінімальна довжина скінченного елемента – $2,383 \cdot 10^{-5}$ м (див. рис. 3.6).

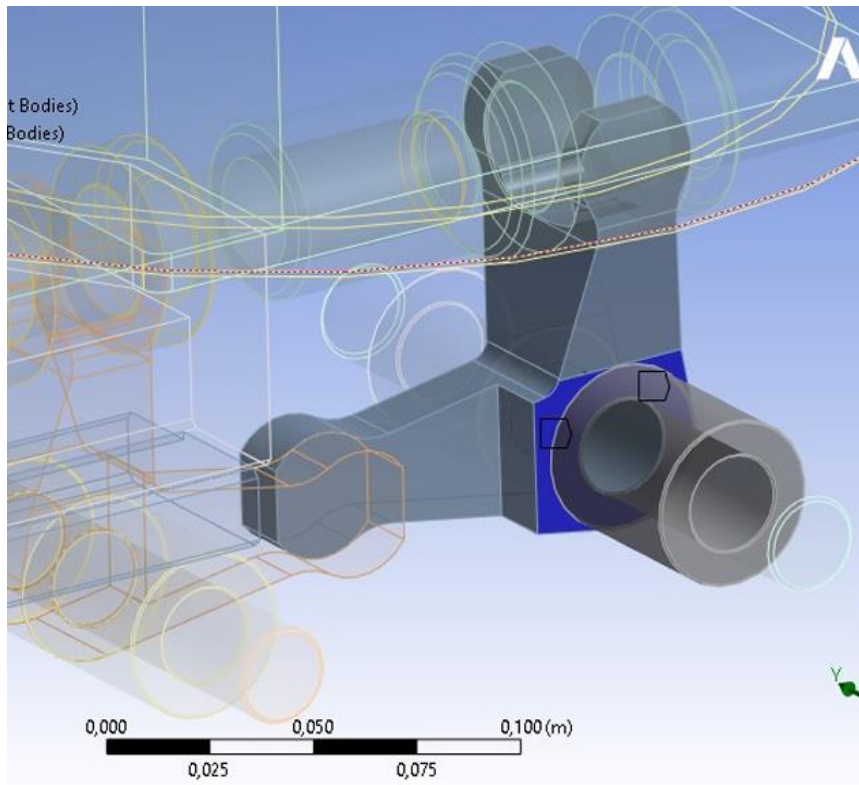


Рисунок 3.3 – Взаємодія спряжених поверхонь пари «важіль-втулка»

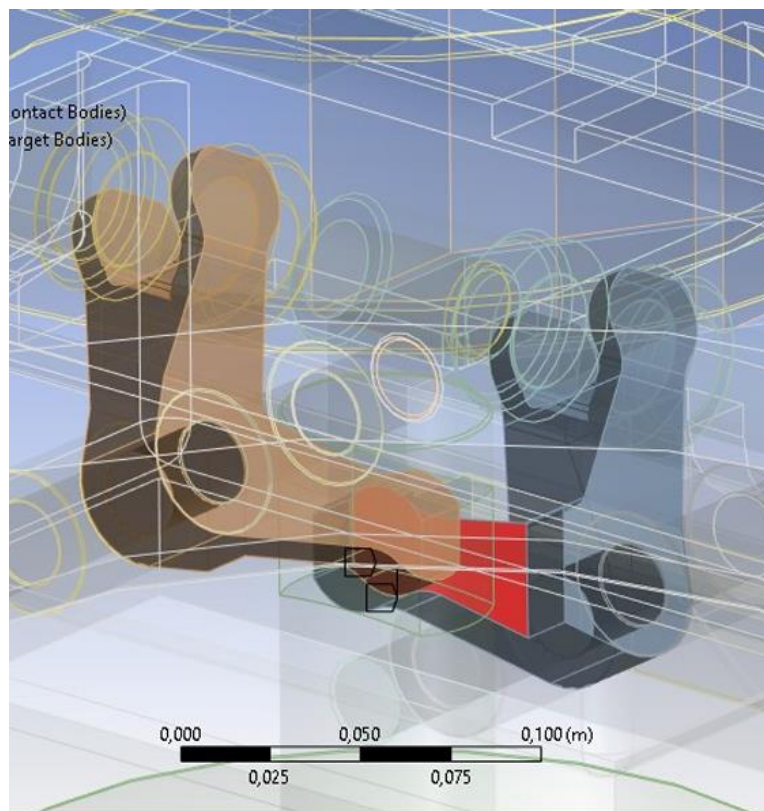


Рисунок 3.4 – Взаємодія спряжених поверхонь пари «важіль-важіль»

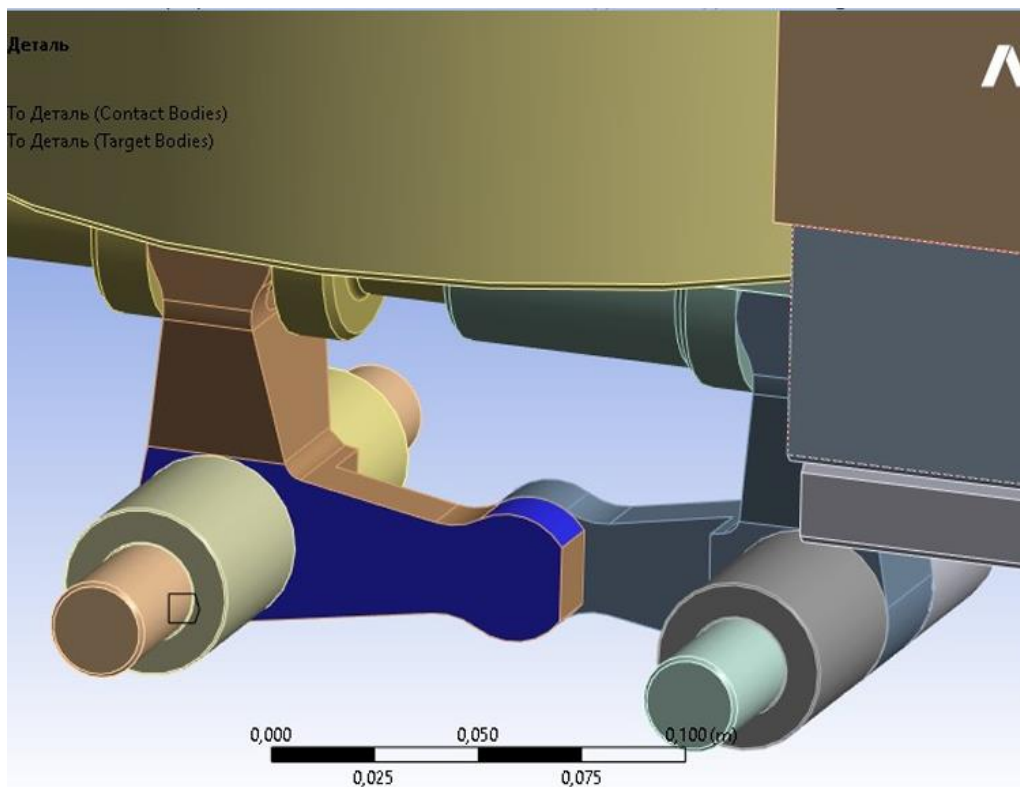


Рисунок 3.5 – Взаємодія спряжених поверхонь пари «важіль-шток»
(шток на рисунку не показаний)

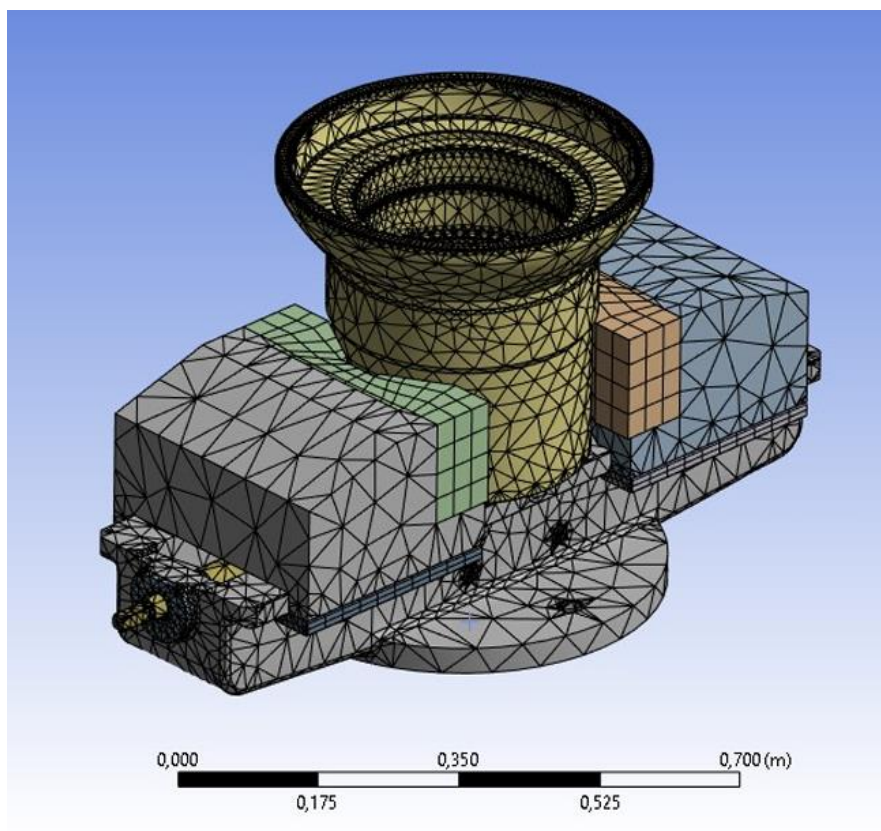


Рисунок 3.6 – Скінченно-елементна сітка моделі

Важливим питанням статичного аналізу є граничні умови, що зокрема визначають джерела силових навантажень, діючих в досліджуваній системі. Так, для розрахункової моделі були задані граничні умови у вигляді поверхонь геометричної моделі, працюючих в умовах жорсткої/фіксованої опори (Fixed Support), крутного моменту (Moment), що намагається повернути заготовку навколо її центральної осі в результаті дії сил різання, та сили (Force) на штоку пневмоциліндра.

Для реалізації жорсткої опори було задано нижню поверхню корпусу лещат (див. рис. 3.7).

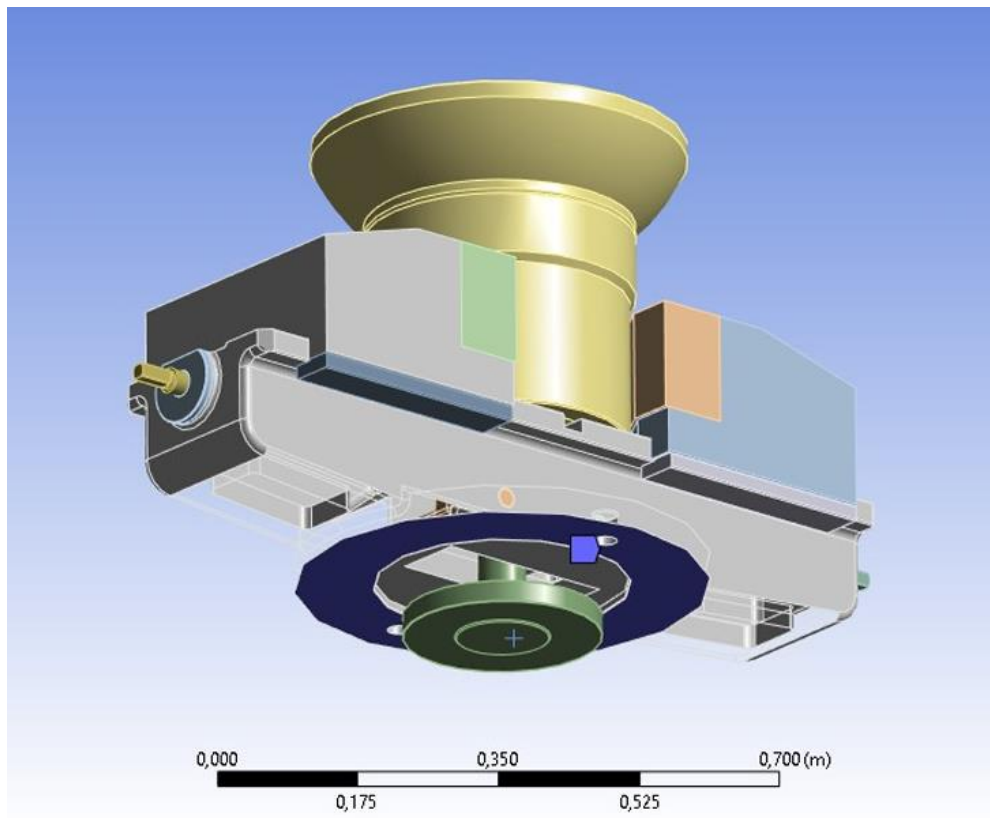


Рисунок 3.7 – Фіксована опора

Крутний момент, що діє на верхній торець заготовки був заданий в розмірі 171 Нм, сила на штоку пневмоциліндра була задана в розмірі 12400 Н (див. рис. 3.8).

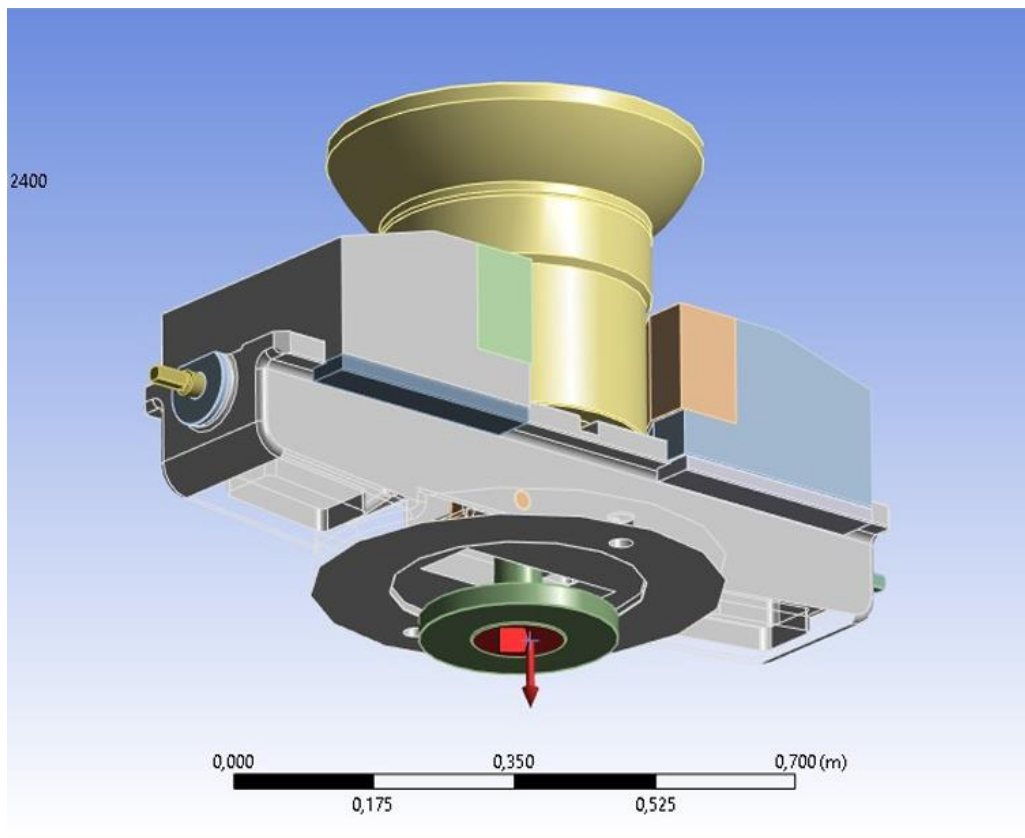


Рисунок 3.8 – Сила на штоку пневмоциліндра

В результаті розрахунку моделі методом статичного аналізу було отримано епюри переміщень (див. рис. 3.9) та внутрішніх напружень (див. рис. 3.10, 3.11).

Аналіз епюри переміщень компонентів моделі показав, що всі переміщення є прийнятними та визначаються кінематикою рухів компонентів моделі. Надлишкових пружних переміщень, які б впливали на точність оброблення поверхонь заготовки в результаті її переорієнтації у просторі, не зафіксовано.

Аналіз епюри внутрішніх напружень показав перевищення допустимої величини у розмірі 250 МПа. Максимальна величина внутрішніх напружень за прийнятих умов склала 298,2 МПа (див. рис. 3.10). Детальний аналіз епюри внутрішніх напружень дозволив виявити місця їх концентрації (див. рис. 3.11). Такими місцями стали циліндрична поверхня осі в місці взаємодії з важелем (298,2 МПа) та кромка в області галтелі важеля (231,9 МПа).

Напруження в розмірі 298,2 МПа є недопустимим і має бути зменшене зокрема шляхом внесення змін в структуру та параметри конструкції осі.

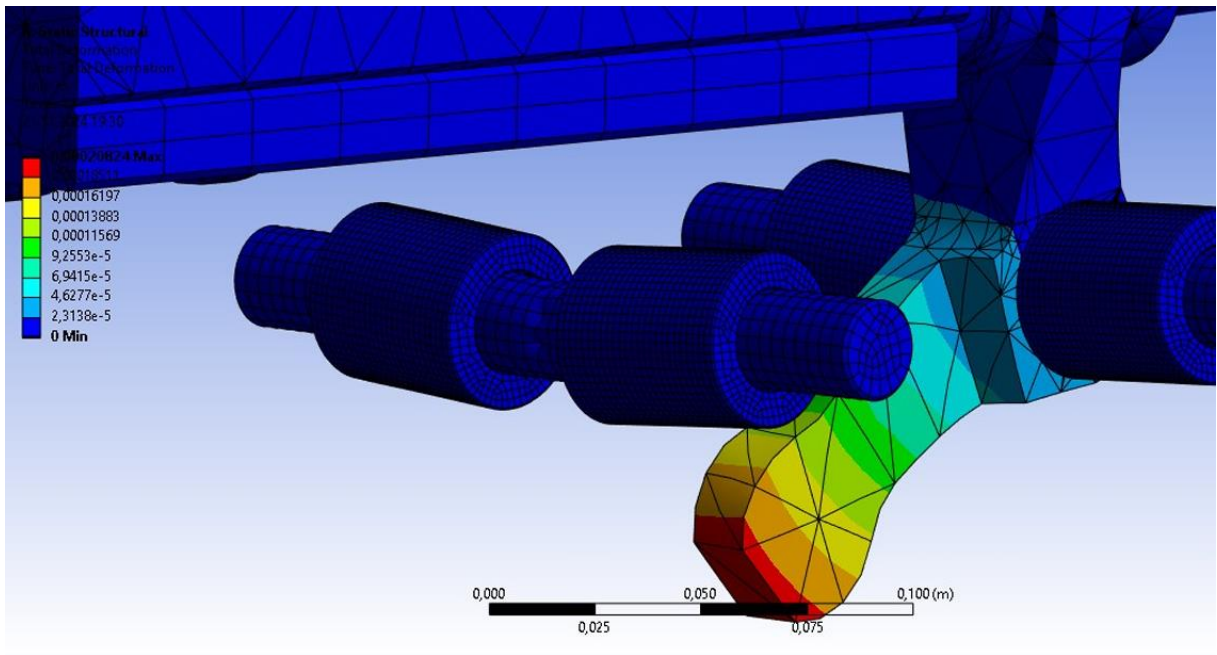


Рисунок 3.9 – Епюра переміщень компонентів моделі

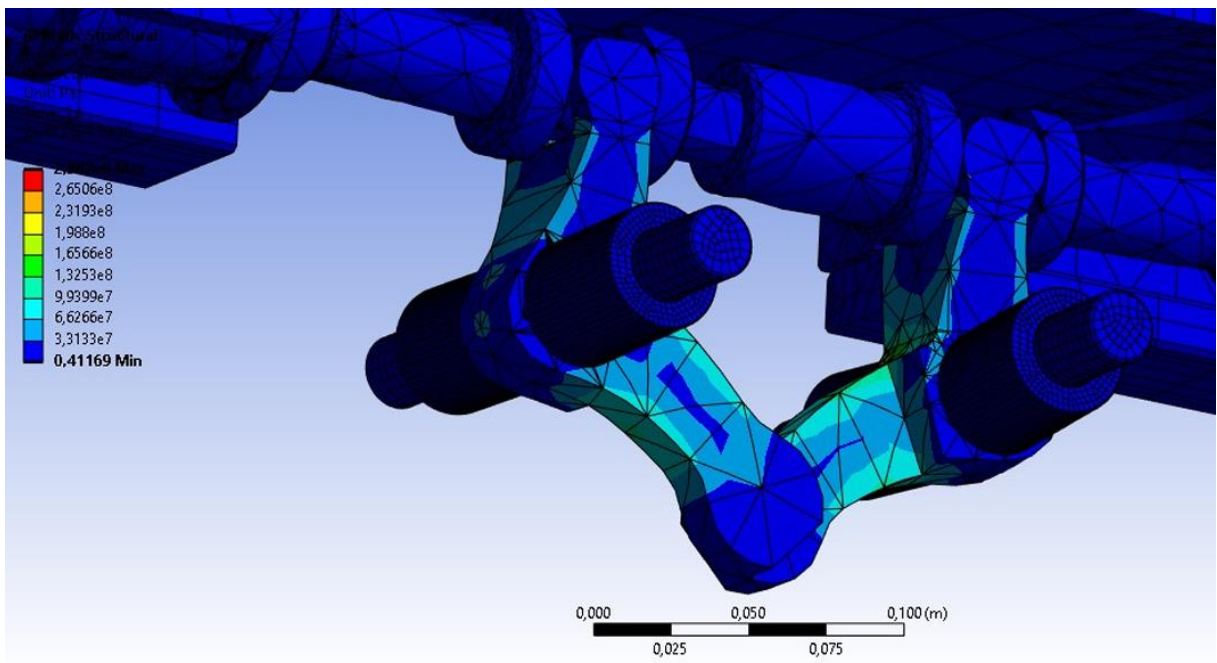


Рисунок 3.10 – Епюра внутрішніх напружень в матеріалі компонентів моделі

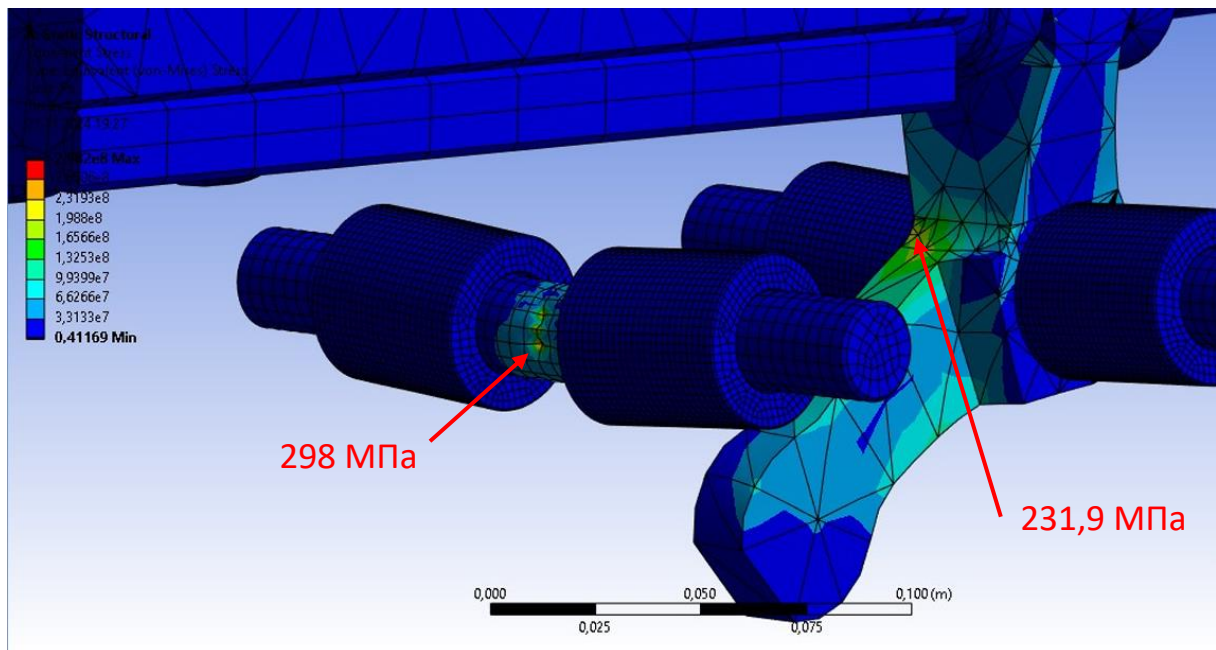


Рисунок 3.11 – Епюра внутрішніх напружень в матеріалі компонентів моделі

Найпростішим рішенням в такому разі може бути збільшення діаметру осі, що збільшить площу поперечного перетину виробу та автоматично зменшить рівень внутрішніх напружень.

Напруження в розмірі 231,9 МПа є великим але допустимим, оскільки не перевищує рівень 250 МПа. Рівень напружень в області галтелі важеля може бути зменшений наприклад шляхом збільшення радіусу галтелі.

В результаті було запропоновано збільшити діаметр осі з 24 мм до 26 мм, а радіус галтелі важеля з 5 мм до 10 мм. Розрахунок моделі після коригування параметрів її компонентів дозволив отримати такі епюри внутрішніх напружень (див. рис. 3.12).

Як видно з рисунка 3.12 максимальний рівень внутрішніх напружень порівняно з первинною моделлю знизився до 160 МПа і перемістився в область галтелі важеля, що є прийнятним. Це означає, що рівень напружень в зоні контакту між важелем та віссю є ще меншим, що також є прийнятним.

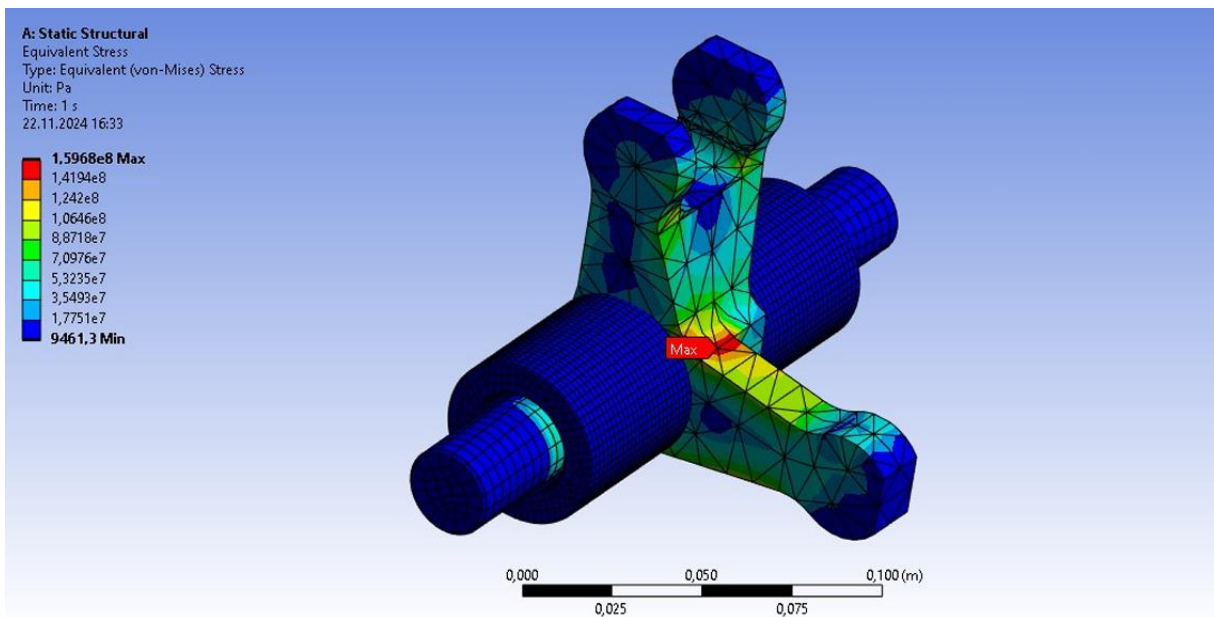


Рисунок 3.12 – Епюра внутрішніх напружень скоригованої моделі

В результаті можна зробити висновок про позитивний характер коригування параметрів компонентів (осі та важеля) первинної моделі системи «заготовка-пристрій», що має знайти віддзеркалення в складальному кресленні верстатного пристрою.

3.3 Топологічна оптимізація компонентів системи верстатного пристрою

Аналіз складальної моделі верстатного пристрою показав, що окремі компоненти мають громіздку конструкцію та відповідно надлишкову масу. Розглянемо можливість топологічної (структурної) оптимізації компонентів на прикладі губки лещат поз. 8 (див. рис. 3.13).

Нижня частина губки адаптована до направляючих корпусу лещат: ширина нижнього паза утворювана протилежними поверхнями 5 (див. рис. 3.13) відповідає ширині розташування направляючих. Права частина губки адаптована під установку призми 16: призма встановлюється в паз 3 по ширині та спирається на поверхні 2.

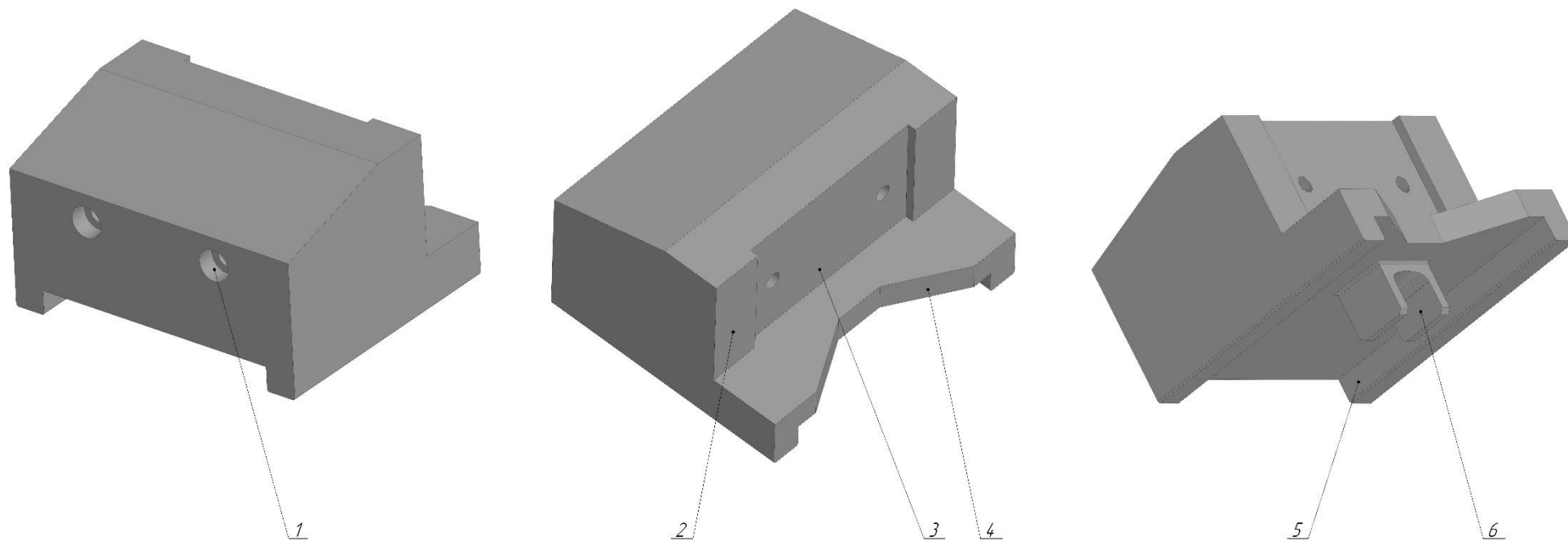


Рисунок 3.13 – Геометрична модель губки (первинний варіант)

В правій частині губки розташований виріз 4 призматичної форми, подібний за своєю конфігурацією формі призми.

В нижній частині губки розташована вилка, утворювана протилежними поверхнями б.

Через тіло губки проходять два східчасті отвори під установку гвинтів для фіксації призми.

Всі зазначені конструктивні елементи так чи інакше мають зберегти свою конфігурацію та розташування для виконання функціонального призначення виробу.

Об'єм матеріалу, розташований між зазначеними функціональними елементами виробу може бути оптимізований. Як критерій оптимізації при цьому буде розглянута мінімізація маси за умови збереження достатньої жорсткості виробу.

Згідно з алгоритмом топологічної оптимізації, що реалізується в модулі Structure Optimization Ansys Workbench перший етап полягає реалізації статичного аналізу моделі виробу. На рисунку 3.14 наведено скінченно-елементну модель виробу.

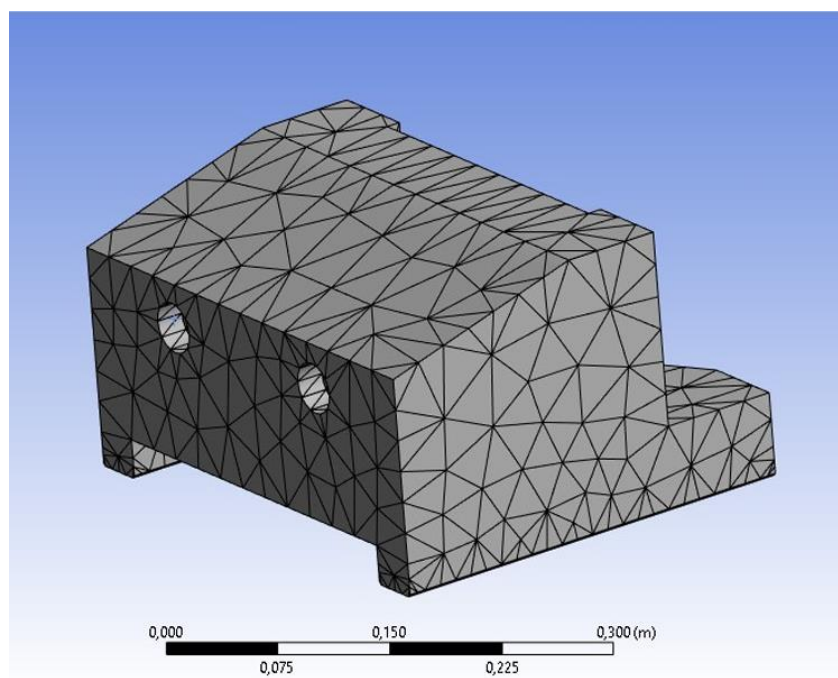


Рисунок 3.14 – Скінченно-елементна сітка моделі

Метод побудови сітки – адаптований, автоматичний. Кількість елементів – 4655, мінімальна довжина елемента – 0,2 мм.

Для зазначення фіксованої опори вибрані поверхні губки, що контактують з поверхнями призми (див. рис. 3.15). Саме через ці поверхні передається зусилля від губки до призми і далі до заготовки.

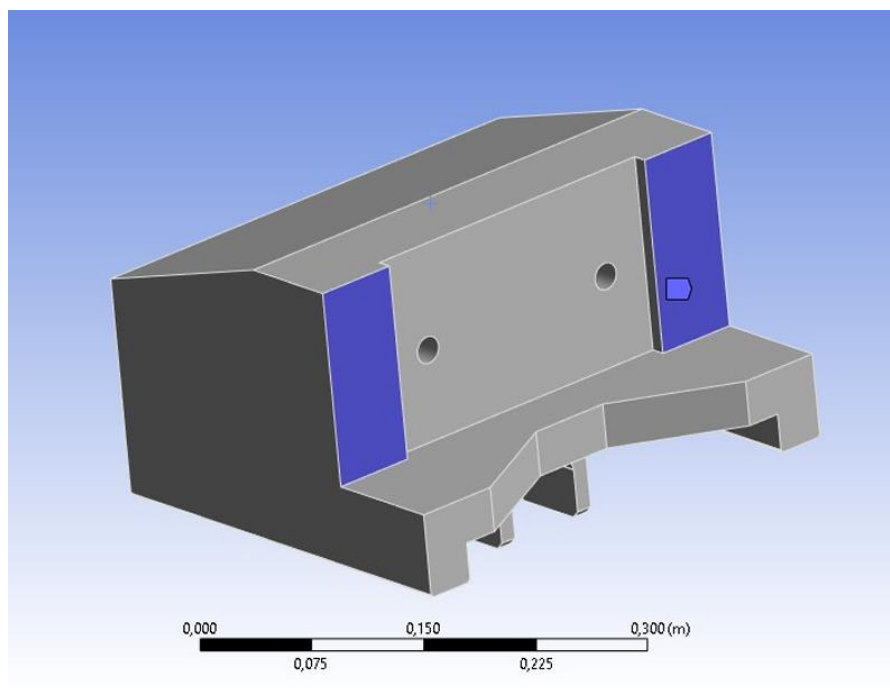


Рисунок 3.15 – Фіксована опора

Ще однією граничною умовою є зусилля 6200 Н, що передається від гвинта та втулки на вилку губки.

В результаті розрахунку моделі було отримано епюру переміщень (див. рис. 3.17) та внутрішніх напружень (3.18).

Епюра переміщень показала максимальний рівень останніх у 5,15 мкм, що є прийнятним. Епюра внутрішніх напружень показала максимальний рівень останніх у 18,8 МПа. Такий рівень напружень є набагато меншим ніж допустима величина, що визначається межею текучості у 250 МПа. Очевидно, що такий великий запас міцності не потрібний для надійного функціонування виробу у складі верстатного пристрою.

Отже наступним кроком буде безпосередньо оптимізація конфігурації виробу за критерієм мінімальної маси.

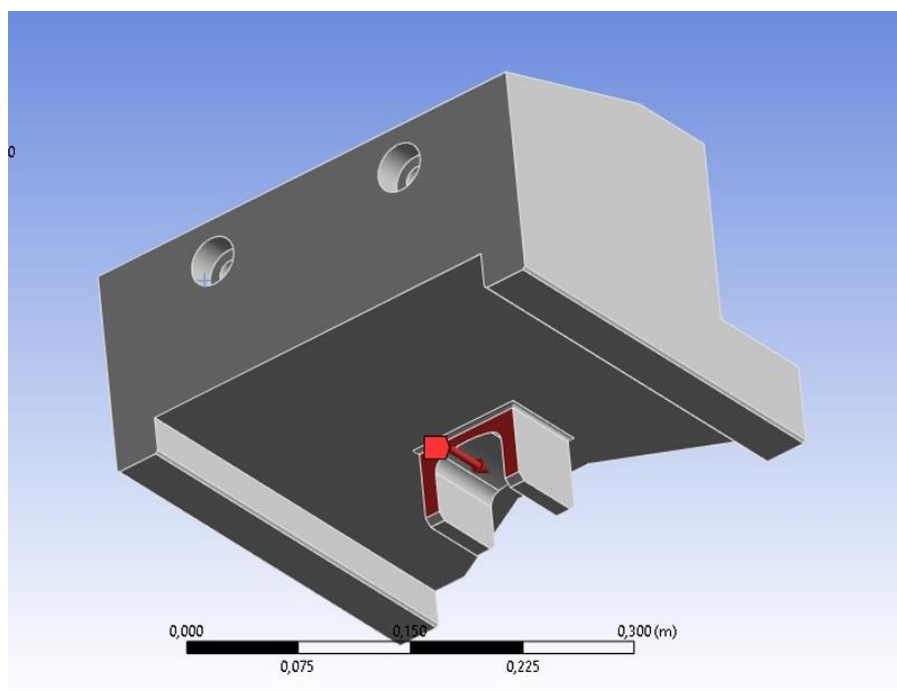


Рисунок 3.16 – Вектор сили

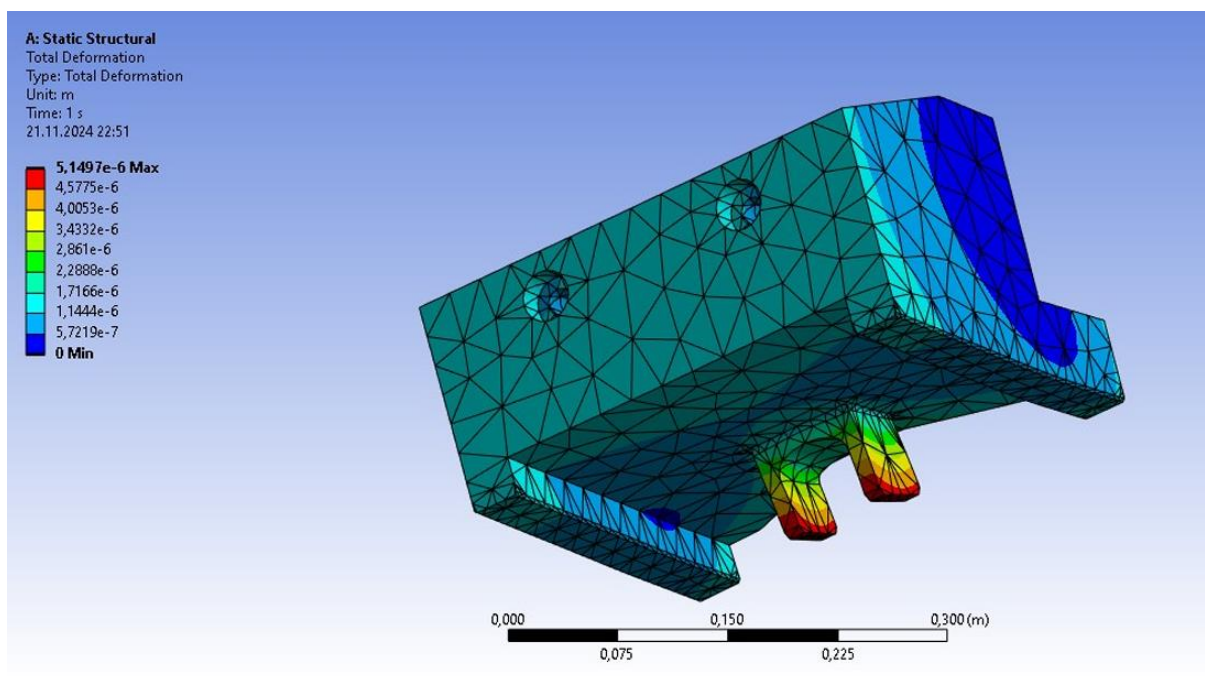


Рисунок 3.17 – Епюра переміщень

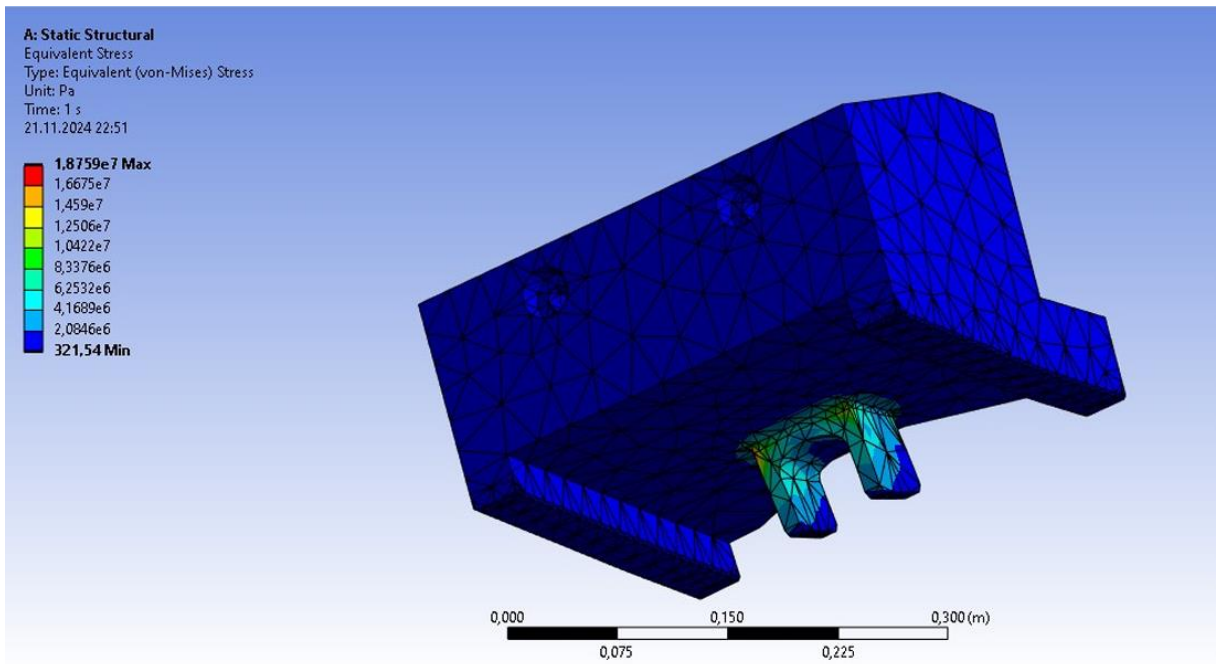


Рисунок 3.18 – Епюра внутрішніх напружень

Первинними даними для реалізації процедури топологічної оптимізації виробу є критерій оптимізації – мінімізація маси за збереження достатнього рівня жорсткості та внутрішніх напружень виробу, а також вибір об’ємів та поверхонь, які можуть та не можуть піддаватись оптимізації (див. рис. 3.19).

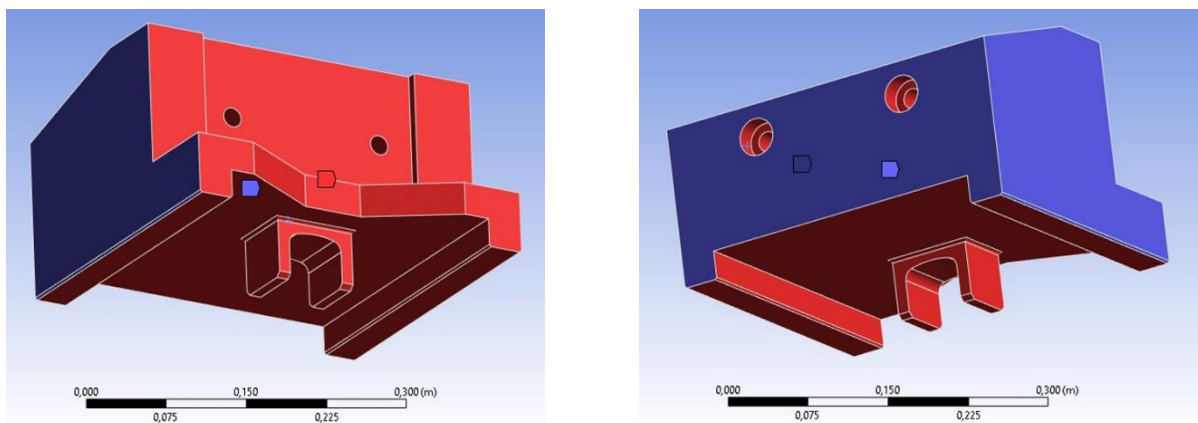


Рисунок 3.19 – Вибір об’ємів та поверхонь, що підлягають чи не підлягають оптимізації

Поверхні, що не підлягають оптимізації, позначені червоним кольором (див. рис. 3.19). Це ті поверхні, що виконують певне функціональне призначення виробу.

В результаті розрахунку моделі було отримано епюру псевдощільності (див. рис. 3.20).

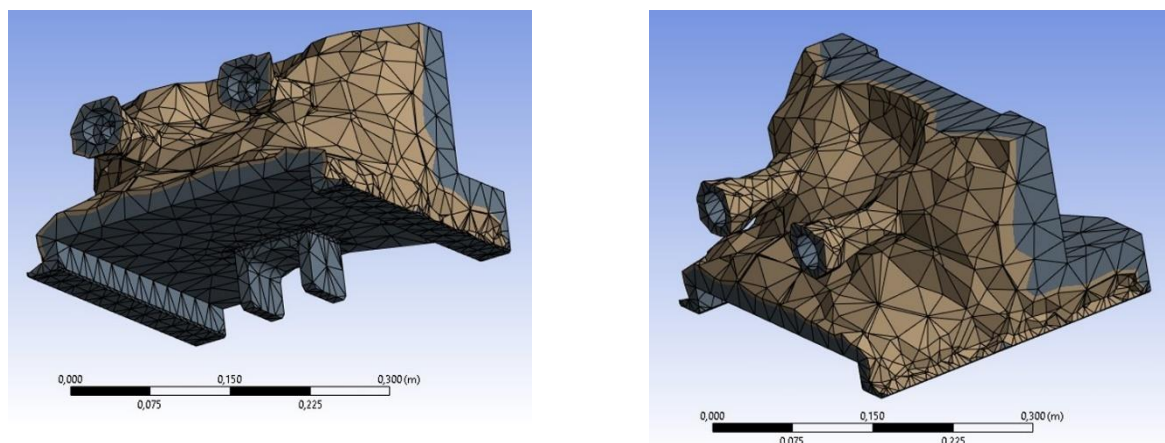


Рисунок 3.20 – Епюра псевдощільності

Тут потрібно зазначити, що алгоритм топологічної оптимізації не надає остаточний оптимальний варіант геометричної моделі виробу, але показує шлях до оптимізації через епюру псевдощільності. На епюрі (див. рис. 3.20) сірим кольором показані поверхні та об'єми, від яких не можна віднімати матеріал. Коричневим кольором показані поверхні та об'єми, які можуть бути оптимізовані додатково, тобто з цих областей за необхідності можна додатково відняти певний об'єм матеріалу.

За результатами аналізу епюри було побудовано твердотільну модель губки, наведену на рисунку 3.21.

Для оптимізованої конструкції губки був проведений перевірочний статичний аналіз, який показав максимальний рівень переміщень 5,44 мкм (див. рис. 3.22) та максимальний рівень внутрішніх напружень – 20,3 МПа (див. рис. 3.23). І переміщення і напруження є прийнятними. Водночас маса губки була зменшена від 102,6 кг до 70,6 кг, тобто маса виробу була зменшена у 1,45 рази, що є суттєвим результатом.

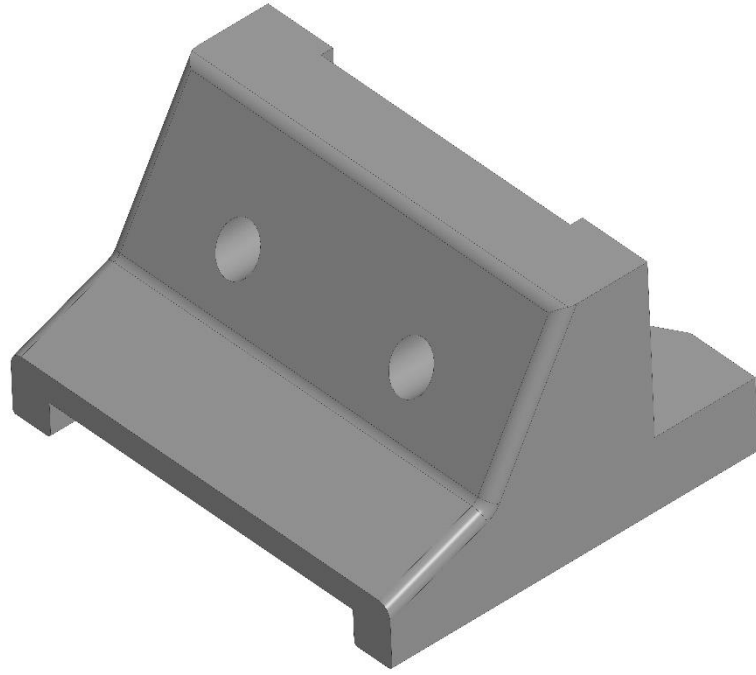


Рисунок 3.21 – Геометрична модель оптимізованої конструкції губки

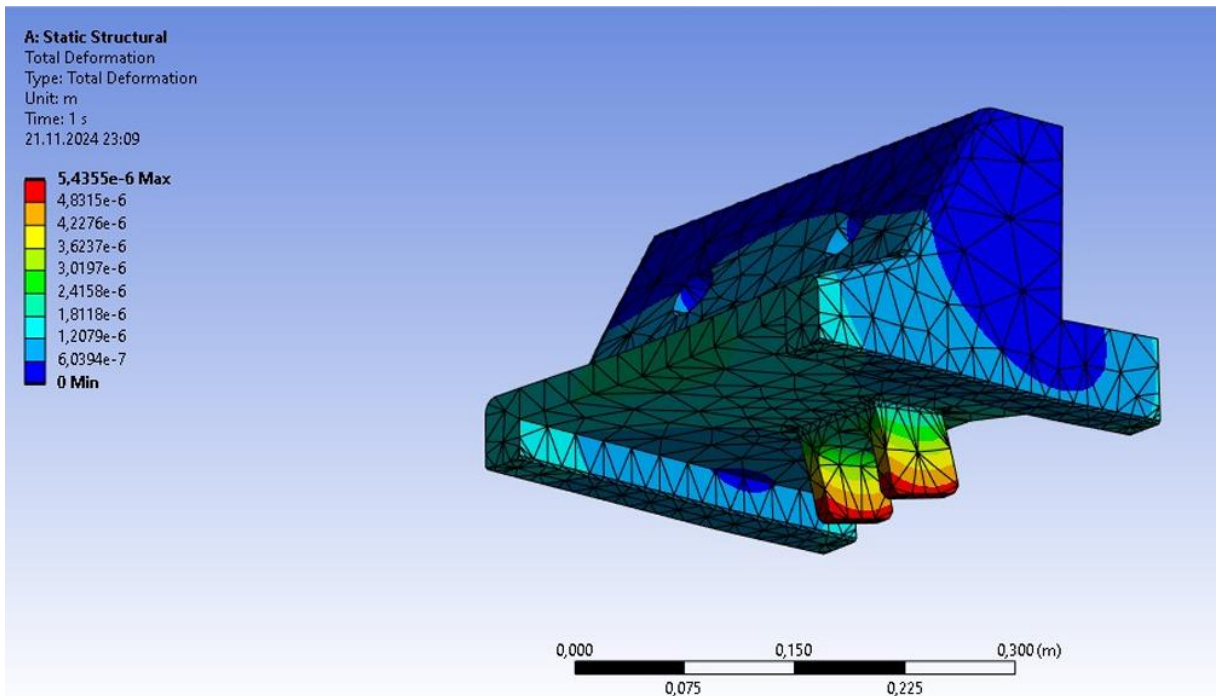


Рисунок 3.22 – Епюра переміщень оптимізованої конструкції губки

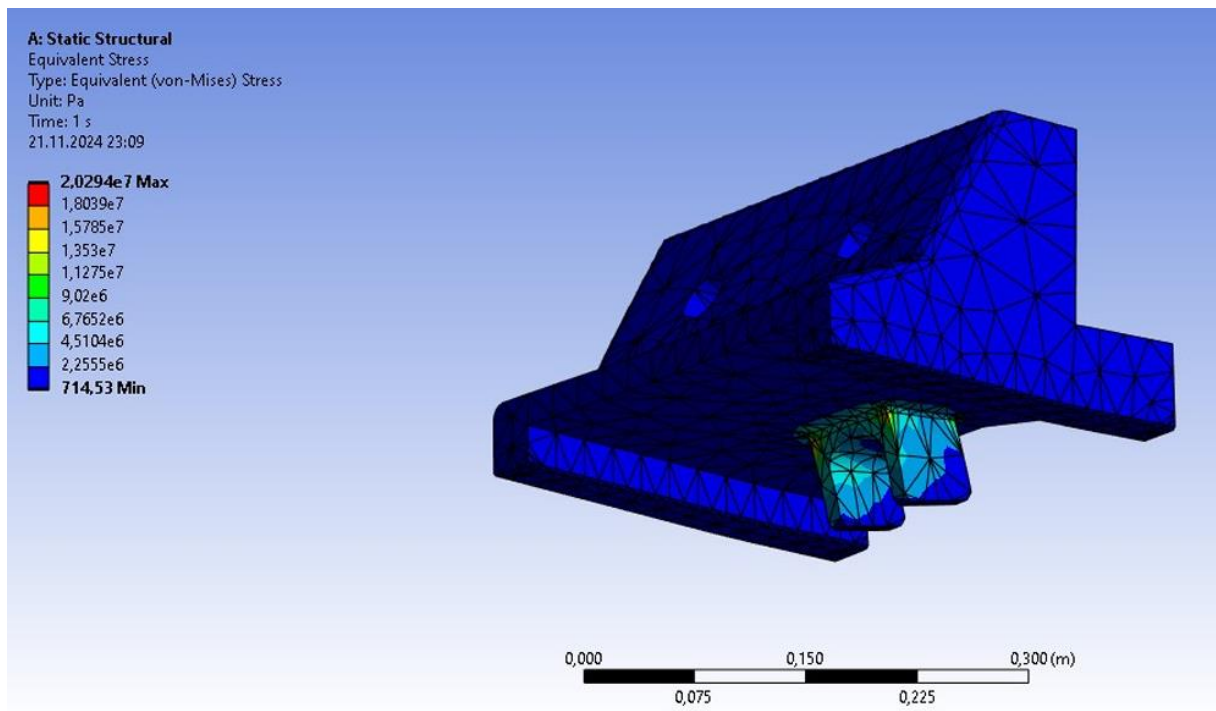


Рисунок 3.23 – Епюра внутрішніх напружень оптимізованої конструкції губки

3.4 Висновок

1. Згідно з завданням шляхом статичного аналізу виконано перевірочні розрахунки проєктних рішень, прийнятих для пропонованої в п. 2.5 цієї роботи конструкції самоцентрувальних лещат з механізованим приводом закріплення заготовки. За результатами статичного аналізу в конструкцію верстатного пристрою були внесені зміни щодо параметрів його компонентів (осі і важеля), що дозволяє забезпечити достатній рівень експлуатаційної надійності пристрою загалом.

2. Топологічний аналіз конструкції губки дозволив запропонувати конструкторські рішення, спрямовані на зниження маси виробу за умови забезпечення достатнього рівня жорсткості та внутрішніх напружень в його матеріалі. В результаті масу губки було знижено у 1,45 рази (зі 102,6 кг до 70,6 кг). Водночас рівень максимальних переміщень збільшився з 5,15 мкм до 5,44 мкм, а максимальний рівень внутрішніх напружень збільшився з 18,7 до 20,3 МПа.

ВИСНОВКИ

1. Згідно з завданням було проаналізовано існуючу (заводську) технологію механічного оброблення заготовки «корпусу підшипників 1.1630-20.20-02» з детальним аналізом таких первинних даних, як службове призначення виробу, технічні вимоги на його виготовлення, тип виробництва, технологічність конструкції виробу. В результаті аналізу були сформульовані зауваження та рекомендації щодо підвищення ефективності базової технології, спрямовані на підвищення продуктивності, зниження собівартості виробництва, та забезпечення сталості технологічного процесу в аспекті точності та якості механічного оброблення.

2. На основі сформульованих в першому розділі зауважень та рекомендацій було запропоновано перспективний технологічний процес виготовлення корпусу підшипників, який зокрема, відрізняється широким використанням верстатів та обробних центрів з ЧПК та верстатних пристроїв з механізованими приводами закріплення заготовок, виключенням операцій розмічування тощо. Для підвищення рівня сталості технологічного процесу в аспекті точності та якості механічного оброблення поверхонь заготовки виконано розмірний аналіз технологічного процесу.

3. В результаті виконання детального аналізу технологічної операції комплексної на обробному центрі з ЧПК для підвищення ефективності використання високотехнологічного металорізального устаткування запропоновано спроектувати самоцентрувальні лещата з пневматичним приводом закріплення заготовки.

4. Для перевірки рішень, запропонованих під час проектування лещат, було проведено дослідження скінченно-елементної моделі системи «заготовка-пристрій» методами статичного аналізу та топологічної оптимізації. В результаті стосовно окремих компонентів лещат були запропоновані рішення спрямовані на їх структурно-параметричну оптимізацію, що в свою чергу має сприяти підвищенню експлуатаційної надійності верстатного пристрою загалом.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Центрифуги підвісні [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://frunze.com.ua/produkcija-3/centrifugi/>.
2. Бойко, Ю. І. Технологія машинобудування. Курсове проектування: навч. посіб. / Ю. І. Бойко, О. А. Литвиненко. Київ: НУХТ, 2018. 195 с.
3. Технологічні основи машинобудування. [Електронний ресурс]: підручник для студ. спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування» / С. С. Добрянський, Ю. М. Малафєєв; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 379 с.
4. Біланенко В. Г. Проектування технологічних процесів. Частина 1. Оброблення деталей-тіл обертання. [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка», спеціалізацій «Технології машинобудування» та «Технології виготовлення літальних апаратів» / Біланенко В. Г., Приходько В. П., Мельник О. О.; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 232 с.
5. Дикань, В. Л. Технологія машинобудівних підприємств: підручник / В. Л. Дикань, Ю. Є. Калабухін, Н. Є. Каличева та ін., за заг. ред. В. Л. Диканя. Харків: УкрДУЗТ, 2020. 386 с.
6. Верстати Sinus серії D (Knuth). Технічні характеристики [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.knuth.com/en/forceturn-630-15-100350>
7. Токарний верстат з ЧПК моделі Forceturn 630.15. Технічні характеристики [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.knuth.com/ru/forceturn-630-15-100350>
8. Вертикальний обробний центр V100. Технічні характеристики [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.leaderwaycnc.com.tw/V/v1100.html>

9. Горизонтальний обробний центр MDH80. Технічні характеристики [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://qz.dp.ua/ua/p1425039120-gorizontalnyj-obrabatyvayuschij-tsentr.html>

10. ДСТУ 8981:2020 Виливки з металів та сплавів. Допуски розмірів, маси та припуски на механічне оброблення.

11. 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.

12. Петров, О. В. Технологічна оснастка : навчальний посібник / О. В. Петров, С. І. Сухоруков. Вінниця : ВНТУ, 2018. 123 с.

13. Ananth, V. K., Manian, S. S., Abinash, M., Sivarajan, S. Investigating the outline of a reconfigurable leaf jig using static structural analysis, Materials Today: Proceedings, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.153>.

14. Erdem, I., Levandowski, C., Berlin, C., Kihlman, H., Stahre, J. A novel comparative design procedure for reconfigurable assembly fixtures. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Volume 19, 2017, Pages 93-105, <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2017.06.004>.

15. Bejlegaard, M., ElMaraghy, W., Brunoe, T.D., Andersen, A.-L., Nielsen, K. Methodology for reconfigurable fixture architecture design. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Volume 23, 2018, Pages 172-186, <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2018.05.001>.

16. Kamble, V.D., Mathew, A.T. Brief review of methodologies for creation of cohesive fixture design. Materials Today: Proceedings, Volume 22, Part 4, 2020, Pages 3353-3363, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.285>.

17. Feng, Q., Maier, W., Braun, S., Möhring, H.-C. Dynamic modeling of the workpiece-fixture contact behavior for intelligent fixture design. Procedia CIRP, Volume 119, 2023, Pages 58-65, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.126>.

18. Static Structural Analysis [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://advanced-eng.cz/reseni-a-sluzby/static-structural-analysis>

19. Christensen, P.W., Klarbring, A. (2009). Introduction. In: An Introduction to Structural Optimization. Solid Mechanics and Its Applications, vol 153. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8666-3_1

20. Ansys Workbench: Overview, Capabilities, Resources and Events [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ansys.com/products/ansys-workbench>