



Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Інженерії машин, споруд і технологій

(повна назва факультету)

Кафедра інжинірингу машинобудівних технологій

(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Окіпний І.Б.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

«

»

2023 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістра

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 131 “Прикладна механіка”

(шифр і назва спеціальності)

студенту Панчуку Вадиму Руслановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення технології виготовлення ролика ЖВМ 22.122.16  
з дослідженням його раціональних конструктивних параметрів

Керівник роботи Васильків Василь Васильович, доктор технічних наук

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

Затверджені наказом ректора від «16» 11 2023\_\_ року № 4/7 -1057

2. Термін подання студентом завершеної роботи \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи Креслення деталі, інформація про технологічні можливості машинобудівного підприємства (перелік устаткування тощо), дрібносерійний тип виробництва (220 шт.)

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Розробити ТП виготовлення ролика та вибрати необхідне спорядження.

2. Розробити методика розрахунку та виконати наукові дослідження стосовно раціональної довжини спряження ролика з валом, на якому він розміщений у складальному вузлі та запропонувати підхід щодо оптимізації конструкції такого ролика з використанням сучасних методик автоматизованого проектування виробів

3. Розглянути питання стосовно охорони праці та безпека в надзвичайних ситуаціях щодо виготовлення ролика ЖВМ 22.122.16: проаналізувати основні пристрої захисного вимкнення, структурувати їх типи та принцип дії, окреслити заходи пожежної безпеки на дільницях механоскладального цеху та провести оцінку стійкості роботи виробничого об'єкту в умовах надзвичайних ситуацій.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Креслення ролика з 3D моделлю заготовки – 1 лист А2,

Верстатний пристрій – 1 лист А1

Технологічні наладки – 2 листа А1

Графічна ілюстрація результатів наукових досліджень (2А1)

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	Ткаченко І. Г., доц. каф. МТ		
<i>Безпека в надзвичайних ситуаціях</i>			

7. Дата видачі завдання 18.11.2023**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
	<i>Аналітична частина</i>	28.11.2023	
	<i>Науково-дослідна частина</i>	04.12.2023	
	<i>Технологічно-конструкторська частина</i>	09.12.2023	
	<i>Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях</i>	16.12.2023	
	<i>Виконання графічної частини</i>	14.12.2023	
	<i>Опублікування матеріалів результатів досліджень</i>	12.12.2023	
	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	20.12.2023	
	<i>Подання роботи до кафедри та попередній захист</i>		
	<i>Захист магістерської роботи</i>	29.12.2023	

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

Панчук В.Р.

\_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_

(підпис)

Васильків В.В.

\_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

В кваліфікаційній роботі розроблено методику розрахунку довжини спряження ролика ЖВМ 22.122.16 з опорним елементом у середовищі програмного математичного програмного продукту із використанням анонімних функцій та технологію виготовлення згаданого ролика.

Мета роботи: Розробити методику розрахунку та виконати наукові дослідження стосовно раціональної довжини спряження ролика з валом, на якому він розміщений у складальному вузлі та запропонувати підхід щодо оптимізації конструкції такого ролика з використанням сучасних методик автоматизованого проектування, а також розробити ТП виготовлення ролика.

У першому розділі виконано аналіз службового призначення ролика “ЖВМ 22.122.16” та його технологічності, структуровано напрямки розробки ТП його виготовлення, сформульовано мету і задачі досліджень.

У другому розділі розроблено методику розрахунку довжини спряження ролика ЖВМ 22.122.16 з опорним елементом у середовищі програмного продукту Wolfram Mathematica із використанням анонімних функцій. Встановлено, що необхідна довжина спряження ролика ЖВМ 22.122.16 з валом повинна становити 60мм. На основі цього скоректовано креслення згаданої деталі. Відзначено, що окремим етапом оптимізації конструкції ролика є перетворення його геометрії на основі методу генеративного дизайну. Результати досліджень особливостей використання такої методики у світі та методика вибору необхідного програмного продукту для її реалізації висвітлена у працях [24-26].

У третьому розділі вибрано метод отримання заготовки, проведено синтез технологічного маршруту виготовлення ролика, розрахунок припусків на обробку та розмірний аналіз технологічного процесу. Також виконано вибір технологічного пристосування, різального і допоміжного інструментів, засобів технічного контролю розмірів ролика. Здійснено визначення режимів різання, проведено технічне нормування ТП та проектування технологічних

наладок. Крім цього, проведено розрахунок та опис верстатного спорядження для оброблення ролика на токарному верстаті моделі 16A20Ф3NCT. Виконано розрахунок технологічної собівартості виготовлення ролика ЖВМ 22.122.16.

У четвертому розділі розглянуто питання стосовно охорони праці та безпека в надзвичайних ситуаціях щодо виготовлення ролика ЖВМ 22.122.16: проаналізовано основні пристрої захисного вимкнення, структуровано їх типи та принцип дії, окреслено заходи пожежної безпеки на ділянках механоскладального цеху та проведено оцінку стійкості роботи виробничого об'єкту в умовах надзвичайних ситуацій.

Робота містить загальні висновки та додатки. Обсяг основної частини роботи виконаний на 61 сторінках.

На основі проведених розрахунків розроблена керуюча програма оброблення ролика на модернізованому верстаті з ЧПК 16A20Ф3NCT, яка наведена у додатку В. Також розроблено комплект документів на технологічний процес виготовлення ролика ЖВМ 22.122.16. У додатку також наведено копії публікацій автора.

Ключові слова: заготовка, ролик, технологічний процес, механічна обробка, спряження, довжина ступиці ролика.

## ЗМІСТ

### ВСТУП

### 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Службове призначення деталі “Ролик ЖВМ 22.122.16” та аналіз його технологічності

1.2 Визначення типу виробництва

1.3 Напрямки розробки ТП виготовлення ролика ЖВМ 22.122.16

1.4 Актуальність досліджень раціональних конструктивних параметрів ролика ЖВМ 22.122.16

1.3 Мета роботи та постановка задач на дипломну роботу

### 2. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

2.1 Методика розрахунку довжини спряження ролика ЖВМ 22.122.16 з опорним елементом (валом)

2.2 Дослідження параметрів спряження ролика ЖВМ 22.122.16 з валом

2.3 Висновки до розділу

### 3. КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНА

3.1 Вибір методу отримання заготовки ролика

3.2 Вибір методів оброблення заготовки

3.3 Вибір технологічних і вимірювальних баз та технологічного устаткування

3.4 Структура технологічного маршруту виготовлення ролика

3.5 Розрахунок припусків на обробку заготовки

3.6 Розмірний аналіз технологічного процесу

3.7 Вибір технологічного пристосування

3.8 Вибір різального і допоміжного інструментів

3.9 Засоби технічного контролю розмірів ролика

3.10 Визначення режимів різання

3.11 Технічне нормування технологічного процесу

3.12 Проектування схем наладок

3.13 Розрахунок верстатного устаткування для оброблення  
заготовки ролика на токарному верстаті моделі 16A20Ф3NCT

3.14 Розрахунок технологічної собівартості ролика

3.15 Висновки до розділу

#### 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Пристрої захисного вимкнення, їх типи та принцип дії

4.2 Заходи пожежної безпеки на дільницях механоскладального цеху

4.3 Оцінка стійкості роботи виробничого об'єкту в умовах  
надзвичайних ситуацій

4.4 Висновки до розділу

#### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

Додатки

Додаток А. Таблиці, рисунки

Додаток Б. Керуюча програма оброблення ролика на верстаті з ЧПК  
16A20Ф3NCT

Додаток В. Методика розрахунку технологічної собівартості  
виготовлення ролика ЖВМ 22.122.16

Додаток Д. Комплект документів на технологічний процес  
виготовлення ролика ЖВМ 22.122.16

Додаток К. Копії публікацій

## ВСТУП

Машинобудування – це найважливіша галузь промислового виробництва України. Вона продукує продукцію у формі машин різного функціонального призначення для всіх галузей промисловості. Сучасний технічний прогрес охоплює такі напрямки діяльності як покращення конструкцій машин і механізмів та безперервне удосконалення технології їх виробництва.

В ринкових умовах виробник повинен якісно, дешево з мінімальними витратами виготовити машину, застосувавши сучасне високопродуктивне устаткування, інструмент, технологічне оснащення, засоби механізації та автоматизації виробництва. Довговічність і надійність роботи машин, що випускаються, а також економіка їх експлуатації залежать від ефективності технічних рішень. Важливими завданнями є підвищення продуктивності праці, раціональне використання матеріальних та трудових ресурсів, технологічність конструкції, зменшення собівартість виробництва. Крім цього виробник повинен забезпечувати екологічну безпеку інноваційного розвитку. Це є найважливішим напрямком забезпечення національної безпеки з урахуванням соціально-економічних інтересів суспільства і держави.

В умовах наростаючих загроз і ризиків стратегії інноваційного розвитку механізми їх реалізації повинні бути орієнтовані на забезпечення еколого-орієнтованого інноваційного розвитку.

На прикладі тих викликів і проблемних питань в економіці України, спричинених збройною агресією росії проти нашої держави ми бачимо домінуючу роль галузі машинобудування для підвищення обороноздатності країни.

Тому актуальними є:

- розробка, створення і впровадження нових маловідходних і безвідходних технологічних процесів, технічних засобів з видобутку ресурсів, їх переробки, використання і утилізації;



- виготовлення машин військово-промислового комплексу з урахуванням екологічної безпеки населення і виробництва;
- виготовлення технічних засобів для використання нових та поновлюваних джерел енергії;
- виготовлення технічних засобів для вдосконалення структури потенційно небезпечних виробництв з метою зниження їх екологічної небезпеки.

Вирішення таких питань нерозривно пов'язане з широким використанням комп'ютерно-інтегрованих технологій [6].

Таким чином тематика нашого розроблення є актуальною.

## 2 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

### 1.1 Службове призначення деталі “Ролик ЖВМ 22.122.16” та аналіз його технологічності

Об’єктом розробки є ролик, який має форму порожнистого тіла обертання. Він є складовою частиною конструкції пристрою машини для обприскування сільськогосподарських культур від шкідників.

Форма ролика забезпечує легкість доступу інструментів для механічного оброблення її поверхонь. Ролик має значну міцність (твердіть 250...270 НВ) та жорсткість, так як відношення його довжини до діаметру становить  $96/126=0,862$ , що менше показника 12. Це дозволяє реалізувати процес його механічного оброблення з використанням високошвидкісних режимів різання без використання додаткового технологічного спорядження.

Матеріал ролика – високоякісна легована хромо-нікель-молібденова сталь 40ХНМА ГОСТ 2590-06. Вона належить до групи матеріалів, які добре обробляються різанням з високими показниками режимів її оброблення методом різання [8]. У технологічному процесі важливою операцією є хімічне оксидне фосфатне покриття для забезпечення необхідних антикорозійних характеристик поверхонь.

Таку деталь доцільно виготовляти із круглого прокату. У цьому випадку коефіцієнт вагової точності дорівнює - 0,612.

Креслення ролика виконано з дотриманням усіх вимог, показані усі необхідні розміри канавок, кутів, фасок, циліндричних ділянок, на кресленні показані усі необхідні показники мікрогеометрії поверхонь.

Усі поверхні крім отвору  $\varnothing 75\text{H}9$  є виконавчими поверхнями. А поверхні фаски  $3\times 45^\circ$ , галтелі радіусами 0.2, 0.26, і 0.79 мм та конічні поверхні  $45$  град. і  $15$  град. є вільними. Вони призначені для забезпечення виходу інструменту, зменшення концентрації напружень при експлуатації, полегшення складання та створення необхідного механічного натягу.

Усі поверхні ролика можна отримати методом оброблення металів

різанням. В цілому деталь технологічна. В таблиці 1.1 описані основні поверхні ролика.

Таблиця 1.1 – Структуризація поверхонь ролика

№	Основні поверхні ролика та її ідентифікатор		Шорсткість поверхні, од. Ra	
1	Циліндрична поверхня	зовнішня	Ø125 H10	5
2			Ø125 f9	0.26
3		внутрішня	Ø105, Ø124 H10	5
5			M70x2 6H 3 мм	
6			Ø8 (4 шт.)	12.6
7, 9			Ø75 H9	0,4
8			Ø85 H9	0,5
4		Циліндричний паз Ø84 H9 (внутрішній)		
10	Різьбова поверхня M60x2 -6H		5	

## 1.2 Визначення типу виробництва

Тип виробництва є дрібносерійний і вказаний у завданні на проектування ТП. Річна програма випуску  $N$  деталей становить 220 шт.

## 1.3 Напрямки розробки ТП виготовлення ролика ЖВМ 22.122.16

Обмеженнями є перелік технологічного устаткування машинобудівного підприємства. З огляду на дрібносерійний тип виробництва для обробки ролика використовуватимемо верстати з наявного парку технологічного устаткування машинобудівного підприємства, зокрема верстати з ЧПК.

Позаяк додаткові елементи розробки ТП виготовлення ролика є такими:

- мінімізація використання універсальних верстатів з метою обмеження

впливу людських факторів на процес виробництва;

- мінімізація використання універсально збірних технологічних пристосувань;

- реалізація ТП з високим значенням коефіцієнту концентрації операцій; виконання оброблення ролика за обмежену кількість зміни його позиціювання;

- використання гарячекатаного прокату підвищеної точності. Це зменшить величину припуску та кількість переходів;

- використання сучасного високопродуктивного різального інструменту.

На машинобудівному підприємстві парк металорізального устаткування містить такі верстати: 16A20Ф3NCT, 16K20, 2P135Ф2, 2H135, САК50135, а також вертикальний свердлильно-фрезерний верстат з ЧПК моделі EASY TOOLS італійської фірми CMS INDUSTRIES.

#### **1.4 Актуальність досліджень раціональних конструктивних параметрів ролика ЖВМ 22.122.16**

Важливим конструктивним параметром ролика ЖВМ 22.122.16 є довжина його спряження з опорним елементом. Для вибору необхідного значення використовують загально-прийнятій підхід щодо вибору довжин ступиць і бобишок. Згідно такого методу дожину згаданого спряження приймають пропорційною діаметру спряження з коефіцієнтом пропорційності 0,45 - 3,2 [18]. В окремих випадках, важливою складовою таких розрахунків є дослідження жорсткості спряжень на основі урахування кута перекосу від контактних деформацій, спричинених зовнішніми силовими факторами. При цьому, розрахункова модель базується на теорії контактної жорсткості, згідно якої ролик розглядається як опорний елемент на пружній основі за умов дійсності гіпотези Вінклера. Для знаходження деформацій використовують функції А.Н. Крилова, або ж таблиці, що розроблені А. Фрейндом і К. Хаясі.

Математичне вирішення поставленої задачі знайдено у роботі Іванова А.С. “Вибір розмірів ступиць та бобишок при конструюванні”, у якій наведена математична модель яка базується на теорії балок умовно защемлених на пружній основі та результатах теоретичних і експериментальних досліджень критичної жорсткості рухомих і нерухомих з’єднань елементів верстатів. При цьому, викладена модель ураховує точність виконання спряжень та умови базування. Зокрема, умова вибору параметрів з’єднання при базуванні ролика циліндричною поверхнею на циліндричному опорному елементі є такою:

$$[\varphi] \geq \varphi = \varphi_{KF_o} \cdot K_{dF} \cdot K_F \cdot K_{nlF} + \varphi_{KM_o} \cdot K_{dM} \cdot K_M \cdot K_{nlM} + \varphi_{Op} + \varphi_3 ,$$

де  $[\varphi]$  - допустимий кут перекосу, що визначається умовами експлуатації;

$\varphi_{KF_o}$  і  $\varphi_{KM_o}$  - значення кутів перекосу із таблиць для відповідного співвідношення довжини та діаметра спряження;

$K_{dF}, K_{dM}, K_F, K_M, K_{nlF}, K_{nlM}$  - уточнюючі коефіцієнти.

Практичне використання запропонованої автором методики ускладнено через необхідність побудови порівняльних таблиць, покрокове отримання наближеного значення, а безпосереднє використання для проектування ролика вимагає наявності теоретичних викладок що оцінюють особливості впливу зовнішніх силових факторів, спричинених технологічними умовами експлуатації такої деталі.

Тому для ефективного використання такого методу важливо його реалізувати в середовищі сучасних математичних програмних продуктів (CAE-систем).

### **1.5 Мета роботи та постановка задач на дипломну роботу**

Метою роботи є розробка технологічного процесу виготовлення ролика ЖВМ 22.122.16 та дослідження його раціональних конструктивних параметрів. В рамках його розробки ми повинні отримати такі технічні рішення та провести розрахунки.

- 1 Вибір методу отримання і оброблення заготовки.
- 2 Вибір технологічних і вимірювальних баз та технологічного устаткування.
- 3 Розробка структури технологічного маршруту виготовлення ролика.
- 4 Розрахунок припусків на обробку та розмірний аналіз ТП.
- 5 Вибір пристосування, а також різального і допоміжного інструментів, засобів технічного контролю розмірів ролика та параметрів його мікрогеометрії.
- 6 Визначення режимів різання та технічне нормування технологічного процесу.
- 7 Проектування технологічних наладок.
- 8 Обґрунтування можливості використання верстатного спорядження для оброблення ролика на вибраному металорізальному верстаті.
- 9 Розрахунок технологічної собівартості продукції.
- 10 Опис рекомендацій і необхідних заходів щодо охорони праці та безпеки життєдіяльності при реалізації ТП виготовлення ролика ЖВМ 22.122.16.
- 11 Розробка методики розрахунку та виконання наукових досліджень стосовно раціональної довжини спряження ролика з валом, на якому він розміщений у складальному вузлі та обґрунтування підходу щодо оптимізації конструкції такого ролика з використанням сучасних методів автоматизованого проектування виробів.

## 2. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

### 2.1 Методика розрахунку довжини спряження ролика ЖВМ 22.122.16 з опорним елементом (валом)

Розрахунок довжини спряження ролика ЖВМ 22.122.16 з опорним елементом здійснено у середовищі програмного продукту Wolfram Mathematica із використанням анонімних функцій та методів наукових досліджень [10, 14, 17, 22]. При цьому прийнято такі припущення:

- а) податливість робочих поверхонь ролика та валу на якому він встановлений є значно більшою ніж їх сумарна податливість у зоні спряження;
- б) центральний кут  $2\varphi_0$  спряження та контактні напруження у зоні такого спряження лінійно зменшуються від граничного значення до нуля;
- в) деформації в спряженні є пропорційними до контактному тиску з коефіцієнтом пропорційності, який є коефіцієнтом контактної податливості (гіпотеза Вінклера);
- г) матеріали валу та ролика ЖВМ 22.122.16 є однаковими (сталь 40ХНМА згідно ГОСТ 2590-06).

Розв'язок задачі щодо визначення довжини  $L$  спряження ролика з валом, на якому він розміщений у формі з використанням анонімних функцій має такий вигляд:

$$L = Root\left[(-1)^\psi k \left( F \sum_{m=1}^{13} 2^{13-m} \beta_T^{m+1} \# 1^m a_{m-1} + M \sum_{m=1}^{13} 2^{14-m} \beta_T^{m+2} \# 1^m b_{m-1} \right) + \lambda_L \pi d_t (ei + Z_z + \tilde{T}) - \lambda_L \pi \# 1 d_t [\varphi] \& \mathfrak{R} \right], \mathfrak{R} \in Z,$$

або

$$L = Root\left[ \frac{(-1)^\psi \tau^K}{d_t} \left( F \sum_{m=1}^{13} c_{m-1} \beta^{m+1} \# 1^m + M \sum_{m=1}^{13} e_{m-1} \beta^{m+2} \# 1^m \right) + ei + \tilde{T} + Z_z \& \mathfrak{R} \right], \quad (2.1)$$

де  $\psi$  і  $k$  – коефіцієнти контактної податливості,  $\text{мм}^3/\text{Н}$ ;

$F$  і  $M$  – відповідно функції силових факторів, які діють в зоні краю спряження, що

визначені на основі урахування навантажень, прикладених до ролика в процесі його експлуатації;

$\beta$  – коефіцієнт, що враховує пружність спряження,  $\text{мм}^{-1}$ ;

$a_{m-1}, b_{m-1}, c_{m-1}, e_{m-1}$  – розрахункові коефіцієнти, значення яких однозначно розраховано у середовищі програмного продукту Wolfram Mathematica (див. додаток А, табл. А.2);

$\lambda_L$  і  $\tau$  – коефіцієнти, що враховують тип спряження: для з'єднання з просвітом

$\lambda_L = 512, \tau = 1.0$  - для з'єднання з натягом  $\lambda_L = 1022; \tau = 0,6$ ;

$d_t$  – посадочний діаметр ролика;

$e_i$  – нижнє відхилення розміру валу в зоні контакту з роликом, мм;

$\tilde{T}$  – сума допусків розмірів отвору ролика  $T_D$  і циліндричної поверхні валу  $T_d$ , мм у зоні їх спряження;

$Z_z$  – величина граничного зношення ролика та валу в спряженні;

$[\varphi]$  – граничне максимальне допустиме значення кута перекосу ролика, рад;

$\mathfrak{R}$  – коефіцієнт порядкового номера кореня анонімної функції програмного продукту Wolfram Mathematica,  $\mathfrak{R} \in \mathbb{N}; \mathfrak{R} \in [1; 14]$ ;

Вид спряження характеризується функцією контактного зміщення, яка є показником довжини дуги, центральний кут якої є радіальним кутом перекосу внаслідок контактних деформацій одного краю спряження відносно іншого.

У загальному випадку, аналітичний вираз для розрахунку функції контактного зміщення краю спряження є таким:

$$\Phi_\varphi = \frac{K}{\pi d_t} \sum_{m=1}^{13} \left[ \frac{\beta^{m+1} L^m}{2^{m-4+\Omega}} (F a_{m-1} + 2M b_{m-1} \beta) \right], \quad (2.2)$$

де  $\Omega$  – коефіцієнт типу спряження: для з'єднання із просвітом  $\Omega=0$ , а для з'єднання з натягом –  $\Omega=1$ .

Умова вибору показника степені  $\psi$  у формулі (2.1) є такою:

$$\psi = \begin{cases} 1, & \forall \Phi_\varphi < 0 \\ 2, & \forall \Phi_\varphi > 0 \end{cases}. \quad (2.3)$$

Коефіцієнт  $\beta$  визначаємо так:



$$\beta = \varphi_{\beta} / (d^3 k)^{1/4}, \quad (2.4)$$

де  $\varphi_{\beta}$  – коефіцієнт, що враховує тип спряження після тривалого терміну експлуатації ролика: для з'єднання із просвітом  $\varphi_{\beta} = (7,08 \dots 6,6) \times 10^{-6}$  МПа<sup>-1</sup>, для з'єднання з натягом  $\varphi_{\beta} = (8,5 \dots 7,9) 10^{-6}$  МПа<sup>-1</sup>.

Початкові умови є такими:

$$S_L = (-1)^{\nu} \Phi_{\varphi} - L[\varphi] + T + Z_z + ei \leq 0; \quad L \notin Q, \quad L \in R, \quad L > 0, \quad L \leq L_{\max}, \quad (2.5)$$

де  $L_{\max}$  – гранично допустима довжина спряження ролика з валом:

$$L_{\max} = \xi_L d_t^{3/4}, \quad (2.6)$$

де  $\xi_L$  – коефіцієнт.

Значення коефіцієнта  $\xi_L$  є такими:

для з'єднань із просвітом  $\xi_L = 9,1$ , для з'єднань з натягом і середнім тиском ( $p \in [2; 5]$  МПа) у спряженні (визначено за формулами Ламе)  $\xi_L = 40800$ , для з'єднань із натягом ( $p \in [8; 15]$  МПа)  $\xi_L = 4.2$ .

Наведена у формулі (2.2) функція  $\Phi_{\varphi}$  є знакозмінною, так як знакозмінними є функції силових факторів (залежать від напрямку вектору їх направлення відносно осі деталі):

$$\begin{aligned} F &= F(\alpha_3^F, \beta^F, \gamma^F, \delta^F, \dots, \omega^F) = F(A^F); \\ M &= M(\alpha^M, \beta^M, \gamma^M, \dots, \omega^M, \alpha_3^F, \beta^F, \gamma^F, \dots, \omega^F) = M(A^M), \end{aligned} \quad (2.7)$$

де  $A^F, A^M$  – множини параметрів від яких залежить величини силових факторів.

Умовою оптимізації довжини контакту ролика з валом є дослідження функції  $\Phi_{\varphi}$  на локальний мінімум відносно згаданих параметрів  $A^F, A^M$  за умов:  $A^M, A^F \notin Q, \quad M^F, A^F > Q; \quad A^M, A^F \in R$ .

Граничне мінімальне значення довжини посадочної поверхні ролика є розв'язками відносно  $M^F$  і  $A^F$  рівняння:

$$F(A^F) \sum_{m=1}^{13} 2^{13-m} a_{m-1} \beta^{m-1} L^{m-1} + M(A^M) \sum_{m=1}^{13} 2^{14-m} b_{m-1} \beta^m L^{m-1} = 0. \quad (2.8)$$

Плече рівноваги  $l_{eq}$  ролика у спряженні є таким:

$$l_{eq} = \sum_{m=1}^{13} \tilde{\Delta}_m^F (L\beta)^{m-1} / \sum_{m=1}^{13} \tilde{\Delta}_m^M L^{m-1} \beta^m, \quad (2.9)$$

де  $\tilde{\Delta}_m^F$ ,  $\tilde{\Delta}_m^M$  – коефіцієнти розв'язку рівняння (див. додаток А.1, табл. А.2).

Діаметр  $D$  торцевого спряження ролика з валом, на якому він розміщений:

$$D = \text{Root}[-L\tilde{U}_D \#1 - ei\#1^5 - ES\#1^5 - L\#1^4 T + Ld_t^4 T_{pev} + L\#1^5 [4] \& \mathfrak{R}], \quad (2.10)$$

де  $\tilde{U}_D$  – функція, що має зміст у випадку  $\sigma_z^{j-1} < 1,4$  МПа;

$T_{pev}$  – сума допусків перпендикулярності  $T_{pev1}$ ,  $T_{pev2}$  на діаметрі  $D$  спряження.

Величина  $\tilde{U}_D$  є такою:

$$\tilde{U}_D = \frac{64(-1)^\varphi M}{\pi} \sum_{j=1}^7 \tilde{P}_{j-1} \sigma_z^{j-1} - \frac{ES + ei}{L} d_t^4 + [\varphi] d_t^4;$$

$$\varphi = \begin{cases} 1, \forall M < 0 \\ 2, \forall M > 0 \end{cases} \quad (2.11)$$

де  $\varphi$  і  $P_{j-1}$  – коефіцієнти розв'язку рівняння, їх значення наведено у додатку в табл. А.2;

$\sigma_z$  – напруження у торцевому спряженні внаслідок їх притискання один до одного;

$ES$  – граничне верхнє відхилення розміру отвору ролика в спряженні з валом.

Граничне значення величини  $\mathfrak{R}$  визначаємо із таких умов:

$$\Phi_D = \left( \frac{ES + ei}{L} - [\varphi] \right) D^5 + T_{pev} D^4 + \tilde{U}_D D - T_{pev} d^4 \leq 0;$$

$$D \notin Q, D \in R, D > 0. \quad (2.12)$$

Показником неможливості реалізації умови (2.12) для заданих значень конструктивних параметрів є отримання у коренях рівняння від'ємних і комплексних значень.

Для випадку безщілинного з'єднання:  $L = 1$ ;  $ES = 0$ ;  $ei = 0$ , тоді вираз (2.10) є таким:

$$D = \text{Root}[-\tilde{U}_D \# 1 - \# 1^4 T_{pev} + d_t^4 T_{pev} + \# 1^5 [\varphi] \& \mathfrak{R}]. \quad (2.13)$$

Врахувавши функцію  $\tilde{U}_D$ , отримаємо:

$$D = \text{Root}[-64M \sum_{j=1}^7 \# 1 c_{j-1} \sigma_z^{j-1} - \pi \# 1^4 T_{pev} + \pi d_t T_{pev} + \pi \# 1^5 [\varphi] - \pi \# 1 d_t^4 [\varphi] \& \mathfrak{R}]. \quad (2.35)$$

## 2.2 Дослідження параметрів спряження ролика ЖВМ 22.122.16 з валом

До ролика може бути прикладене як радіальна, так і осьове силове навантаження. Величину співвідношення між ними ми можемо оцінити за допомогою коефіцієнта осьового підтиску  $\zeta_p$  ролика.

Для зручності оцінювання граничного інтервалу довжин спряження ролика з валом припустимо доцільно використати показник  $\mu_v = L_{\max} / L_{\min}$ .

На рисунку 2.1 показано зростання  $\mu_v$  зі зменшенням діаметра та відповідної суми полів допусків спряження (рис. 2.1 – 2.3). Отже, величина  $L/d_t$  змінюється в широких межах залежно від силових факторів,

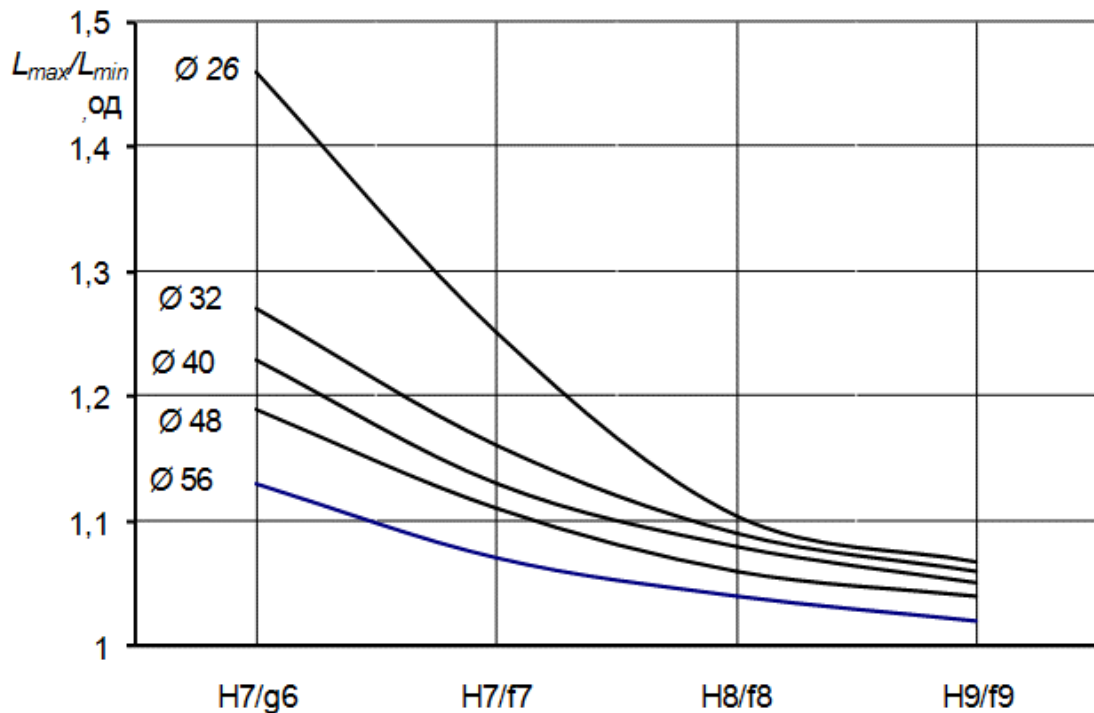


Рисунок 2.1 - Залежність співвідношення граничних значень довжини спряження ролика ЖВМ 22.122.16 з валом (коефіцієнт  $\mu_v$ ) від різних квалітетів точності та полів допусків відповідних діаметрів таких спряжень

прикладених до ролика, а умова необхідність забезпечення жорсткості його з'єднання з валом є обов'язковим для незначних діаметрів такого спряження, як от у конструкції ролика ЖВМ 22.122.16.

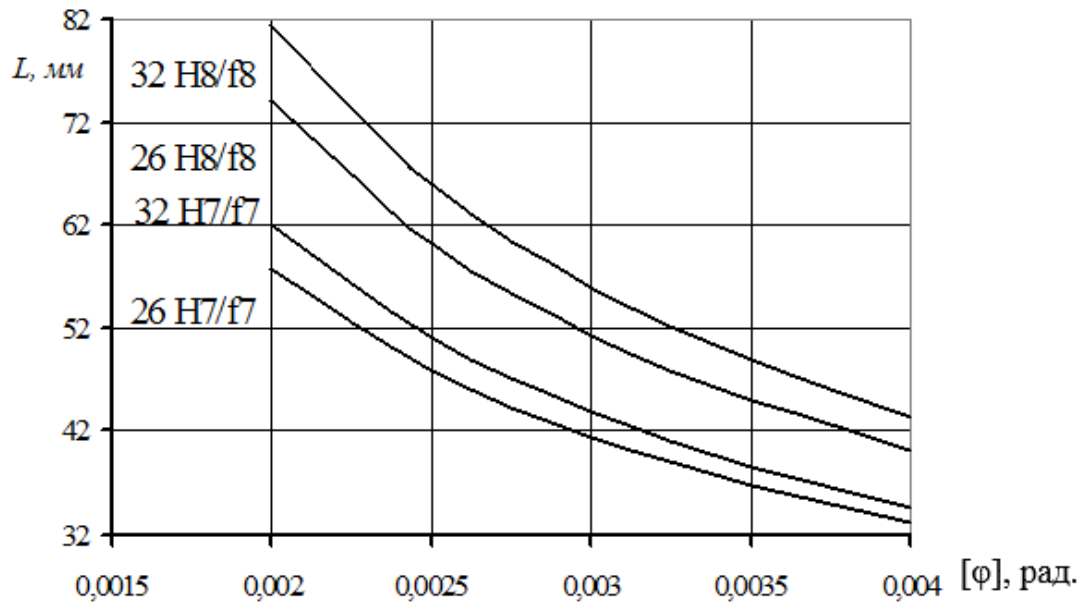


Рисунок 2.2 - Залежність необхідної довжини спряження ролика ЖВМ 22.122.16 з валом від величини допустимого кута перекосу для різних характеристик спряження

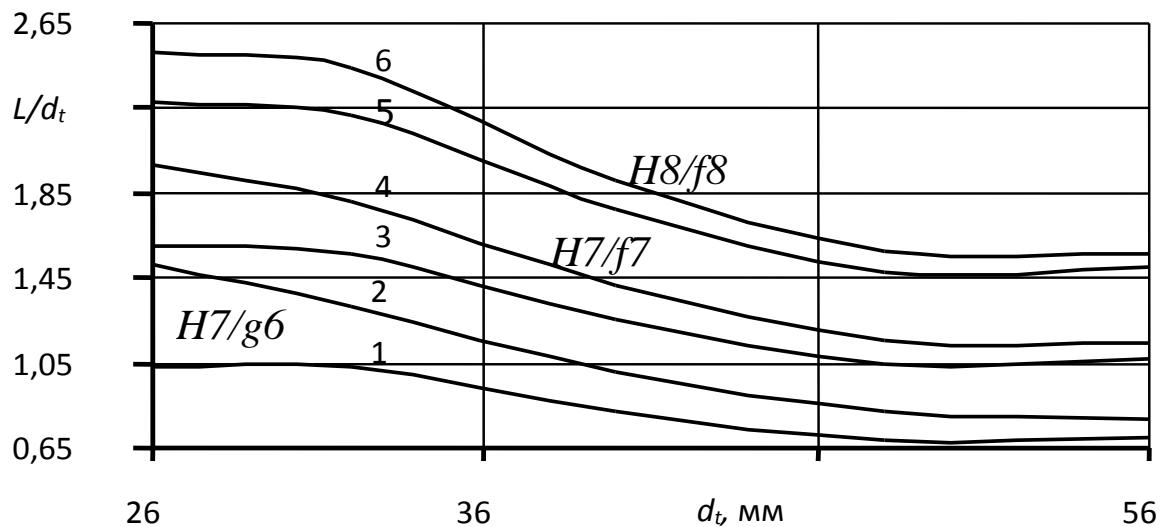


Рисунок 2.3 - Діапазони залежностей  $L/d_t$  від діаметрів спряження ролика інструмента з віссю для різних квалітетів і полів допусків та різних значень силових факторів, прикладених до ролика: 1, 3, 5 –  $L_{min}/d_t$  ; 2, 4, 6 –  $L_{max}/d_t$  ( $L_{min}$ ,  $L_{max}$  – граничні значення  $L$ )

Проведемо розрахунок параметрів ролика ЖВМ 22.122.16 у середовищі програмного продукту Wolfram Mathematica.

*Приклад 1.* Контакт ролика з опорним елементом по циліндричній і торцевій поверхнях за умов:  $d_t=70$ ; спряження Н7/f7;  $\Omega=0$ ;  $D_p=124$  мм;  $E=2,110^5$  МПа;  $\zeta_p=0,8$ ;  $a_B=0$ ; силові фактори, які прикладені до ролика  $F=1,2$  кН;  $M=-34$  кН мм;  $[\varphi]=0,002$  рад;  $k=4 \times 10^{-3}$  мм<sup>3</sup>/Н;  $z_z=0$  мм;  $\tau=1$ ;  $\xi_L=9,025$ . Для вибраного спряження  $e_i=0,05$  мм;  $T_D=0,025$  мм;  $T_d=0,025$  мм.

Таблиця 2.1 - Результати розрахунків довжини спряження ролика з валом

$\psi$	$\Re$	$L$ , мм	$\Phi_\varphi$ , рад·мм	$S_L$	$\psi$	$\Re$	$L$ , мм	$\Phi_\varphi$ , рад·мм	$S_L$
1	1	-0,2282	-	-	2	1	0,4587	-	-
	2	52,4566	-0,0038	-2,28 $10^{-6}$		2	28,9401	-	-
	3	154,7	-	-		3	44,3378	-0,007<0	-
	4	25,7-11,7i	-	-		4	39,77-19,90i	-	-
	5	25,7+11,5i	-	-		5	39,77+19,90i	-	-
	6	55,8-25,7i	-	-		6	75,09-23,65i	-	-
	7	55,8+25,7i	-	-		7	75,09+23,65i	-	-
	8	89,4-33,8i	-	-		8	156,8-32,17i	-	-
	9	89,4+33,80i	-	-		9	156,8+32,17i	-	-
	10	123,6-32,04i	-	-		10	138,1-53,8i	-	-
	11	123,6+32,04i	-	-		11	138,1+53,8i	-	-
	12	156,6-34,9i	-	-		12	160,28-9,9i	-	-
	13	156,6+34,9i	-	-		13	160,28+9,9i	-	-

В результатів розрахунків (таблиця 2.1) бачимо, що необхідна максимальна довжина спряження ролика з валом повинна не перевищувати 62 мм ( $\psi=2$ ;  $\Re=3$ ;  $l_{eq}=25,5$  мм,  $\Phi_\varphi=-0,007$  рад·мм –від'ємне значення). Після

пошуку оптимального значення знаходимо, що мінімальне значення довжини ролика становить 53 мм.

*Приклад 2.* Контакт ролика з опорним елементом тільки по циліндричній поверхні за умов: силові фактори  $F = 1,1$  кН;  $M = -0,4$  кНмм,  $r_p = 0,5 D_p = 124$  мм;  $\Omega = 0$ ;  $z_z = 0$  мм; діаметр спряження  $d_i$  70 Н7/g6,  $[\varphi] = 0,002$  рад/мм;  $\tau = 1$ ;  $\xi_L = 9,025$ ,  $k = 4 \times 10^{-3}$  мм<sup>3</sup>/Н,  $ei = 0,025$  мм,  $T_D = 0,025$  мм,  $T_d = 0,025$  мм.

Таблиця 2.2 - Результати розрахунків довжини спряження ролика з валом

$\psi$	$\Re$	$L$ , мм	$\Phi_\varphi$ , рад·м м	$S_L$	$\psi$	$\Re$	$L$ , мм	$\Phi_\varphi$ , рад·мм	$S_L$
1	1	6,1562	-	-	2	1	-1,564	-	-
	2	20,27-19,8i	-			2	59,139	0,0256	-2,89 $10^{-6}$
	3	20,27+19,8i	-	-		3	171,09	-	
	4	35,9-35,3i	-	-		4	18,90-23,7i	-	-
	5	35,9+35,3i	-	-		5	19,56+73,79i	-	-
	6	69,3-51,3i	-	-		6	50,38-34,93i	-	-
	7	69,3+51,3i	-	-		7	50,78+34,93i	-	-
8	8	112,94-51,5i	-	-	8	8	89,50-53,1i	-	-
	9	112,94+51,5i	-	-		9	89,50+53,1i	-	-
	10	152,89-35,6i	-	-		10	128,6-48,8i	-	-
	11	152,89+35,6i	-	-		11	128,6+48,8i	-	-
	12	169,4-11,9i	-	-		12	160,2-28,1i	-	-
	13	169,4+11,9i	-	-		13	160,2+28,1i	-	-

Із таблиці 2.2 бачимо, що необхідна мінімальна довжина спряження ролика з валом повинна становити 59 мм ( $\psi = 2$ ;  $\Re = 2$ ;  $\Phi_\varphi = 0,02$  рад·мм,  $S_L = -2,5 \cdot 10^{-6}$ ).

На основі таких розрахунків прийнято, що необхідна довжина спряження ролика ЖВМ 22.122.16 з валом повинна становити 60мм.

### **2.3 Висновки до розділу**

1. Розроблено методику розрахунку довжини спряження ролика ЖВМ 22.122.16 з опорним елементом у середовищі програмного продукту Wolfram Mathematica із використанням анонімних функцій.

2. Встановлено, що необхідна довжина спряження ролика ЖВМ 22.122.16 з валом повинна становити 60мм. На основі цього скоректовано креслення згаданої деталі.

3. Наступним етапом оптимізації конструкції ролика є перетворення його геометрії на основі методу генеративного дизайну. Результати досліджень особливостей використання такої методики у світі та методика вибору необхідного програмного продукту для її реалізації висвітлена у працях [ ].

### 3. КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСИТИНА

#### 3.1 Вибір методу отримання заготовки ролика

Виготовлення ролика ми можемо здійснювати, використовуючи заготовки, які отримані способами кування, литтям, з прокату, штампування. Вони дозволяють отримувати початкові заготовки з малими припусками.

У процесі вибору початкової заготовки ми враховуємо:

1 Тип виробництва (дрібносерійний) при малій програмі випуску виробів ( $N=220$  од.).

2 Малі розміри (довжина 90 мм, зовнішній діаметр 124 мм, внутрішній діаметр 70 мм) і вагу ролика (4.8 кг).

3 Марку матеріалу (сталь 40ХНМА ГОСТ 2590-06).

Ми здійснюємо вибір способу отримання заготовки з урахуванням економічності використання матеріалу і скорочення працемісткості механічного оброблення.

Заготовка може бути отримана литтям [5, 7], куванням, або ж з сортового суцільного або трубного прокату. Для останніх обох методів нами проведено розрахунок коефіцієнтів ваговій точності [8]: Для першого способу  $K_1 = 0.51/4.9 = 0,11$ , для другого  $K_2 = 0.51/9.2 = 0,06$ . При цьому  $Q_1 = 4.9$  кг,  $Q_2 = 9.2$  кг. Таким чином ми повинні використовувати сортовий прокат.

Розрахунок маси заготовок здійснюємо на основі побудови їх 3D моделі в САД системі та автоматично визначаємо їх масу, використовуючи їх функціональні можливості (рис. 2.1). при цьому ми враховуємо припуски і напуски. Методика створення різними методами 3D моделей описана у працях [1-4]. Отже  $Q_1 = 9.889$  кг.

У випадку використання каліброваного гарячекатаного прокату згідно ТУ 14-1-1530-75 ГОСТ 4543-71 зі сталі 40ХНМА  $Q_2 = 8,951$  кг

Об'єми заготовок рівні

$$V_{z1} = 0.0012603175 \text{ м}^3; \quad V_{z2} = 0.00114070312 \text{ м}^3$$



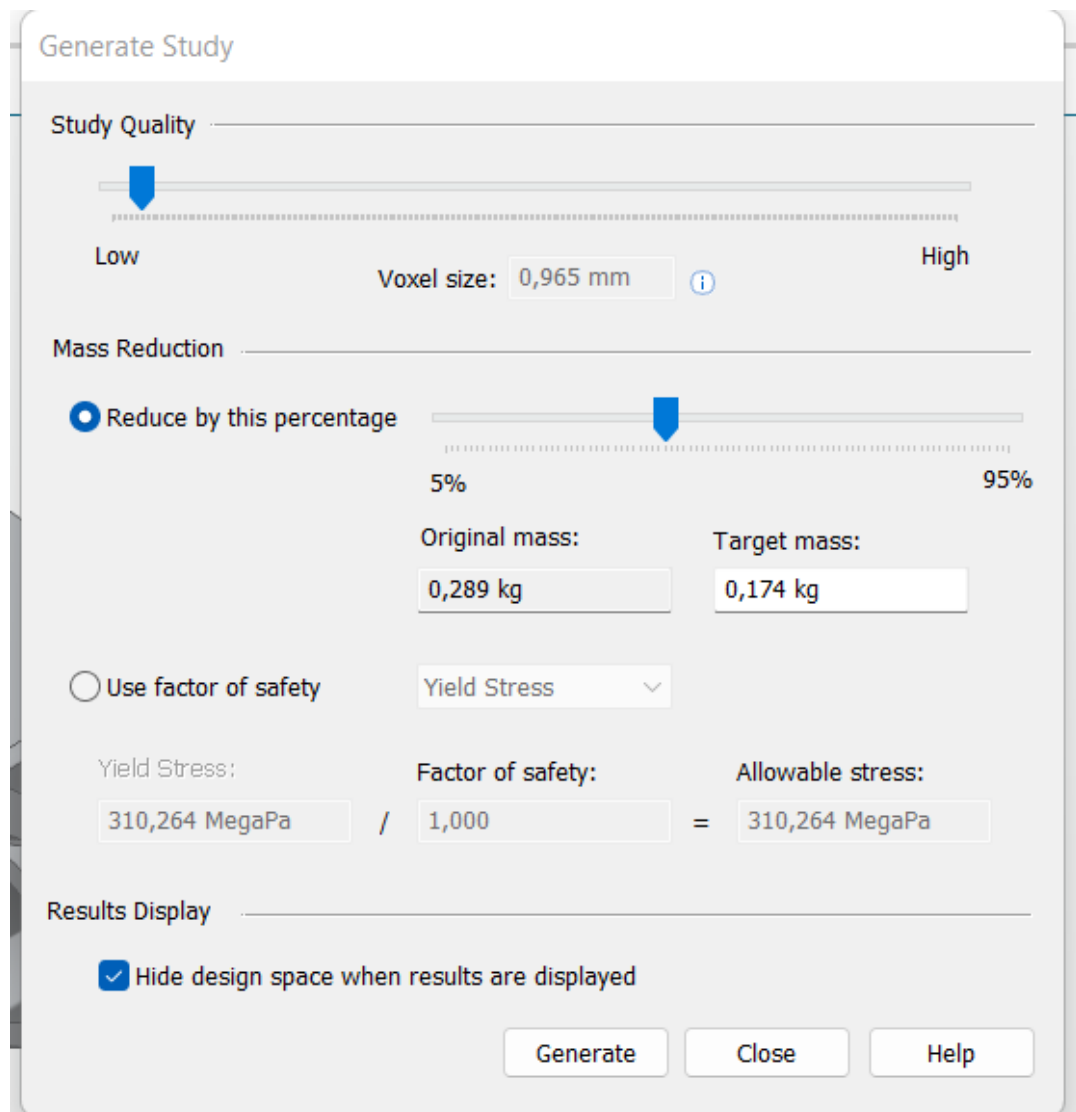


Рисунок 3.1 - Діалогове вікно автоматичного визначення маси заготовки в середовищі програмного продукту Solid Edge

Вартості  $M_1$ ,  $M_2$  заготовки за кожним із варіантів ми визначаємо з урахуванням оптової ціни  $S_k$  за одиницю ваги матеріалу за преїскурантом, коефіцієнта  $K_T$ , що враховує транспортно-заготівельні витрати, маси  $q$  реалізованих відходів, ціни  $S_w$  1-го кілограма відходів [9]:

$$M = Q_3 S_k K_T - q S_w,$$

$$M_1 = 9.889 \cdot 100 \cdot 1,05 - 5,089 \cdot 20 = 936,57 \text{ грн.}$$

$$M_2 = 8.951 \cdot 100 \cdot 1,05 - 4,151 \cdot 20 = 856,84 \text{ грн.}$$

Розраховуємо різницю вартості вибраних видів заготовок [2]:

$$Z = M_1 - M_2, \text{ грн.}, \quad (3.1)$$

$$Z = 79,72 \text{ грн.}$$

Потім ми визначаємо річну економію матеріалу за обома варіантами [3]:

$$\mathcal{E}_M = \frac{G_\delta (K_1 - K_2)}{K_1 \cdot K_2} N, \text{ кг}, \quad (3.2)$$

де  $G_\delta$  – маса виробу, кг;

$$\mathcal{E}_M = \frac{4.8(0.11 - 0.059)}{0.11 \cdot 0.059} \cdot 200 = 187,6 \text{ кг}$$

Потім ми розраховуємо річну економію вартості заготовок на основі показника різниці вартості  $Z$  [15, 16]:

$$\mathcal{E}_{с.з.} = Z \cdot N, \text{ грн.}, \quad \mathcal{E}_{с.з.} = 79,73 \cdot 200 = 15953 \text{ грн.}$$

Таким чином, на основі отриманих даних ми визначаємо повну річну економію від впровадження вибраного типу заготовок з урахуванням скорочення витрат на механічне оброблення, показників  $Z_1$  і  $Z_2$  основної заробітної плати виробничих робітників за кожним варіантом виконання заготовки, а також цехових накладних витрат  $H$  (в інтервалі 100 – 300 %) [15, 16]:

$$E = \mathcal{E}_{с.з.} + (Z_1 - Z_2) \left(1 + \frac{H}{100}\right) N, \text{ грн.}, \quad (3.3)$$

Для цього ми спочатку визначаємо основну заробітну плату  $Z_{оп}$  виробничих робітників за час виконання однієї операції з урахуванням показників хвилинної заробітної плати  $S_{рМ}$  для даного розряду роботи та штучного часу  $T_{sh}$ :

$$Z_{оп} = S_{рМ} \cdot T_{sh}, \text{ грн.}, \quad (3.4)$$

Однак ми спочатку визначаємо показник хвилинної заробітної плати на основі величини годинної ставки  $S_p$ , що залежить від розряду роботи та тарифного коефіцієнту даного розряду роботи:

$$S_{pM} = S \cdot k, \text{ грн.}, \quad (3.5)$$

$$S_{pM} = 0,540 \text{ грн.}$$

Далі ми визначаємо сумарну заробітну плату за сумарною кількістю операцій  $n$  технологічного процесу [15]:

$$Z = \sum_{i=1}^n S_{pM} T_{um.}, \text{ грн.}, \quad (3.6)$$

$$Z_{op1} = 112 \text{ грн.}, \quad Z_{op2} = 52 \text{ грн.}$$

У підсумку ми визначаємо повну річну економію від впровадження прогресивних заготовок з урахуванням скорочення витрат на механічне оброблення:

$$E = 15953 - (112 - 52) \left(1 + \frac{300}{100}\right) \cdot 200 = 64542 \text{ грн.}$$

Із розрахунків ми бачимо, що метод отримання заготовки з прокату є найперспективнішим.

### 3.2 Вибір методів оброблення заготовки

Ми підбираємо методи оброблення для всіх поверхонь ролика згідно з показниками точності і шорсткості. Результат вибору нами представлено у таблицях 2.1 і 2.2.

Таблиця 2.1 – План оброблення основних поверхонь

№ поверхні	Розмір, мм	Квалітет точності	Шорсткість, Ra в мкм	Метод оброблення поверхні
1	Ø 124	h11	2,5	Чистове точіння
		h11	6,3	
2	Ø7 5	H9	2,5	Свердління
3	Ø84.2	H9		
4	Ø 70	12h	6,3	Чистове
5	Ø 71,50	14h	12,5	
6	M70	6H	3,2	
7	Ø 8	H9	10	

Таблиця 3.2 – План оброблення основних поверхонь ролика

Розмір поверхні ролика	Вимоги до поверхні ролика	Параметри поверхні після оброблення		
	Шорсткість, од. Ra	Технологічні переходи	Точність	Шорсткість, од. Ra
124- <sub>0,16</sub>	5	Заготовка (W)	Ø 130	✓ (5)
		Чорнове точіння (RT)	Ø 126- <sub>0,4</sub>	5
		Чистове точіння (FT)	Ø 124- <sub>0,16</sub>	5
Ø 120	3,2	W	121.8	✓ (Ra 3,2)
		RT		
Ø 105 50±0,1	2,5	W	103- <sub>0,1</sub>	3,2
		RT		
Ø 75 50±0,1	3,2	W	IT 10	✓ (Ra 3,2)
		RT	±0,1	2,5
		W	IT 10	✓ (Ra 3,2)
Ø 84 30±0,1	1,25	RT	±0,1	3,2
		Напівчистове точіння (SFT)	IT 10	✓ (Ra 3,2)
		FT	h9	3,2
		W	h8	2,5
90 30±0,1	3,2	RT	±0,1	Ra 1,25
		W	IT 10	✓ (Ra 3,2)
M70 12,5±0,1	2,5	RT	h9	3,2
		W	IT 10	✓ (Ra 3,2)
		RT	h9	2,5
Ø8 12,5±0,1	3,2	SFT	IT 10	✓ (Ra 3,2)
			h9	12,5
			h8	3,2

### 3.3 Вибір технологічних і вимірювальних баз та технологічного устаткування

Основною конструкторською базою ролика є циліндрична поверхня Ø130 h10. Базування ми повинні здійснювати по торцю і зовнішній циліндричній поверхні заготовки на першому етапі оброблення.

З огляду на це в якості технологічних баз на токарних та свердлильних операцій ми використовуємо поверхні діаметрами 130 та 124 мм. У цьому випадку вимірювальні бази збігаються з технологічними.

Для комплексного оброблення заготовки із переліку технологічного устаткування машинобудівного підприємства ми вибрали модернізований токарний верстат моделі 16A20Ф3NCT для токарного оброблення і фрезерний оброблювальний центр моделі АВАМЕТ VF-2SM. Ми будемо виконувати операцію відрізання на стрічково-пильному верстаті моделі 8A544. На нашу думку таке устаткування повинно забезпечувати задану точність і якість оброблених поверхонь при максимальній продуктивності праці. Згадані верстати були вказані в переліку найменш завантаженого технологічного устаткування на машинобудівному підприємстві. Як альтернатива, виготовлення ролика також можна здійснювати на верстаті HYUNDAI KIA SKT-100.

### 3.4 Зміст технологічного маршруту виготовлення ролика

Маршрут оброблення ролика представлено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Основні елементи маршруту оброблення ролика

№ з/п	Найменування операції, технологічне спорядження і устаткування	Зміст операції	Розмір	Технологічна база
1	2	3	4	5
005	Відрізна операція; верстат мод. 8A544, пила Геллера	Розкрій довгомірної заготовки	Ø130x95	Торець заготовки
010	Слюсарна операція, верстак, тиски	Притуплення гострих крайок на торцях ролика		

Продовження табл. 3.3

1	2	3	4	5
020	Операція токарна з ЧПК; спеціальний трьох кулачковий патрон; 16A20Ф3NCT	Установ 1. Підрізання торця; точіння зовнішньої циліндричної поверхні; точіння зовнішньої циліндричної поверхні, точіння канавки, свердління отвору	$\varnothing 130$ , $\varnothing 120$ , $\varnothing 105$ , $\varnothing 75$	Циліндрична поверхня $\varnothing 130$ і її торець
		Установ 2 Напівчистове оброблення різанням циліндричних поверхонь; розточування отвору	$\varnothing 50$ , $\varnothing 70$ , $\varnothing 76$ , $\varnothing 78$ , $\varnothing 82$	Циліндрична поверхня $\varnothing 84$ і торець; $\varnothing 76$ і відповідний торець
025	Операція свердлильна с ЧПК; трьох кулачковий патрон; АВАМЕТ VF-2SM	Центрування отворів, свердління 4-х отворів	$\varnothing 8$ , $\varnothing 100$	Циліндрична поверхня $\varnothing 124$ мм і відповідний торець
030	Слюсарна операція, верстак	Зачищення поверхонь від залишків налиплого матеріалу, притуплення крайок		
035	Термооброблення; спеціальне пристосування	Покриття поверхні	$\varnothing 80$	Циліндричні поверхні $\varnothing 75$ , $\varnothing 80$ і їх відповідні торці
040	Мийна операція; ванна	Промивання ролика		
045	Контрольна операція; контрольний стіл	Виконання повного контролю розмірів і параметрів шорсткості поверхонь	Усі розміри	

### 3.5 Розрахунок припусків на обробку заготовки

Припуски на обробку ми можемо розраховувати, використовуючи аналітичний та табличний методи [19]. Як приклад першого методу ми проведемо розрахунок припусків на отримання зовнішньої циліндричної поверхні  $\varnothing 124h10_{-0.16}$ . Вона характеризується шорсткістю Ra2.5, допуском  $T=0.16$  мм; обробку виконують на токарному верстаті з ЧПК. При цьому, заготовку закріплюють в трьох кулачковому патроні, який споряджений пневматичним затиском.

Початкова заготовка це - гарячекатаний прокат, круг ТУ14-1-950-86 ДСТУ 2590-2006.

План оброблення є таким: чорнове розточування (допуск  $T_1= 1,0$  мм, шорсткість - Rz 40); напівчистове точіння (допуск  $T_2 = 0.4$  мкм, шорсткість Rz 30); чистове точіння (допуск  $T_3= 0,16$  мм, шорсткість Ra 2,5).

Граничні відхилення проміжних розмірів:

$$ei_1 = ei_2 = ei_3 = 0; ei_1 = -1 \text{ мм}; ei_2 = -0,4 \text{ мм}; ei_3 = -0.16 \text{ мм}.$$

Граничні відхилення заготовки:  $ES_{zag.} = 0.05 \text{ мм}, ei_{zag.} = 0 \text{ мм}.$

Розрахунок мінімальних припусків здійснюємо за відомою формулою, враховуючи висоту  $R_{z(i-1)}$  виступів профілю на попередньому переході; сумарне відхилення  $\Delta_{\Sigma(i-1)}$  розташування і форми поверхні; глибину  $h_{i-1}$  дефектного поверхневого шару на попередньому переході; похибку  $\varepsilon_i$  установки заготовки на виконуваному переході.

$$2Z_{i\min} = 2[(R_z + h)_{i-1} + \sqrt{\Delta_{\Sigma(i-1)}^2 + \varepsilon_i^2}], \quad (3.7)$$

а). Перший перехід токарної операції  $R_{zzag} = 124$  мкм,  $h_{zag} = 250$  мкм.

Далі ми розраховуємо сумарне відхилення розташування і форми поверхні, враховуючи відхилення  $\Delta$   $\rho$  кривизни:

$$\Delta_{\Sigma_{\text{зар}}} = l \cdot \frac{\Delta\rho}{\Delta\rho^2 + 0.25}, \quad (3.8)$$

де  $l = 95$  мм,  $\Delta\rho = 0,2$  мкм на одиницю довжини заготовки

Таким чином, сумарні відхилення розташування і форми поверхні

$$\Delta_{\Sigma_{\text{зар}}} = 95 \cdot \frac{0,2}{0,1^2 + 0.25} = 73 \text{ мкм.}$$

Для розміру  $\text{Ø}124h10_{-0.16}$  похибка встановлення в радіальному напрямку  $\varepsilon_1 = 200$  мкм.

Таким чином ми розраховуємо необхідний мінімальний припуск при чорновому розточуванні:

$$\text{Ø}2Z_{\text{min}} = 2(124 + 95 + \sqrt{250^2 + 200^2}) = 1040 \text{ мкм.}$$

б). Другий перехід токарної операції  $R_{z1} = 30$  мкм.  $h_1 = 70$  мкм.

У наступному етапі ми розраховуємо похибку розташування і форми поверхні після першої операції:

$$\Delta_{\Sigma 1} = \Delta_{\Sigma_{\text{зар}}} \cdot K_y \quad (3.9)$$

де  $K_y = 0,06$ ,  $\Delta_{\Sigma 1} = 2$  мкм,  $\varepsilon_2 = 22$  мкм.

Ми розраховуємо мінімальний припуск при напівчистому точінні за такою формулою:

$$2Z_{2\text{min}} = 2((30+70) + \sqrt{2^2 + 22^2}) = 222 \text{ мкм.}$$

Для третього переходу показник шорсткості  $R_z$  становить 30 мкм.

Глибина дефектного шару після другого переходу (операції)  $h_1 = 20$  мкм.

Далі ми визначаємо похибку розташування і форми поверхні після першої операції

$$\Delta_{\Sigma 2} = 35 \cdot 0,05 = 1,72 \text{ мкм}$$

Ми приймаємо похибку установки:  $\varepsilon_3 = 12$  мкм.



Потім ми визначаємо мінімальний припуск при чистовому точінні за формулою:

$$2Z_{3 \min} = 2 \cdot \left[ (30 + 20)_{i-1} + \sqrt{2,7^2 + 12^2} \right] = 113 \text{ мкм}$$

Потім ми визначаємо номінальні припуски:

$$2Z_{i \text{ ном}} = 2Z_{i \min} + |ei_{i-1}| - |ei_i|, \quad (3.10)$$

$$2Z_{1 \text{ ном}} = 1038 + 2000 - 250 = 2788 \text{ мкм}$$

$$2Z_{2 \text{ ном}} = 221 + 250 - 124 = 347 \text{ мкм}$$

$$2Z_{3 \text{ ном}} = 112 + 124 - 40 = 197 \text{ мкм}$$

Далі ми визначаємо максимальні припуски:

$$2Z_{i \max} = 2Z_{i \min} + Td_{i-1} - Td_i, \quad (3.11)$$

$$2Z_{1 \max} = 1038 + 1300 - 250 = 2088 \text{ мкм}$$

$$2Z_{2 \max} = 221 + 250 - 124 = 347 \text{ мкм}$$

$$2Z_{3 \max} = 112 + 124 - 20 = 216 \text{ мкм}$$

Усі результати розрахунків зводимо в таблицю.

Порівняння припусків.

Загальний номінальний припуск, отриманий розрахунково-аналітичним методом складає 2,651 мм.

Табличний припуск для гарячекатаного сортового прокату, круглого поперечного перерізу ТУ14-1-950-86 за ГОСТ 7417-75 не перевищує 5 мм, тобто на 1,35 мм більший за розрахований.

На основі проведених розрахунків у зведеному вигляді значення номінальних розмірів зі збереженням встановлених допусків на всіх операціях (переходах) є такими:

Для заготовки - Ø130

Чорнове точіння - Ø130<sub>-3</sub>

Напівчистове точіння - Ø126<sub>-0,4</sub>

Остаточне точіння - Ø124<sub>-0,16</sub> (з креслення ролика).

На основі цього ми будуємо схему розташування допусків і припусків на оброблення поверхні Ø124<sub>-16</sub> мм (рис. 3.2).

Таблиця 3.4 – Припуски і граничні розміри по операціях (перехід) на поверхню Ø124h10 ролика

Технологічна операція (переходи)	Допуск T, мкм	Елементи припуску, мкм				Значення припусків, мкм			Розрахунковий (номінальний) розмір, мм	Граничні розміри, мм	
		Rz	h	$\Delta_{\Sigma}$	$E_y$	$2Z_i$ min	$2Z_i$ ном	$2Z_i$ max		max	min
Заготовка	1300	40	250	58	—	—	—	—	127,655	127,065	125,663
Точіння чорнове	250	30	70	3,4	200	1039	2788	2088	124,726	124,736	124,484
Точіння напівчистове	124	30	20	2,9	21	222	347	347	124,277	124,287	124,128
Точіння тонке	20	—	—	—	13	113	196	216	124	123,986	123,961
Загальні припуски	—	—	—	—	—	1371	3331	2651	—	—	—

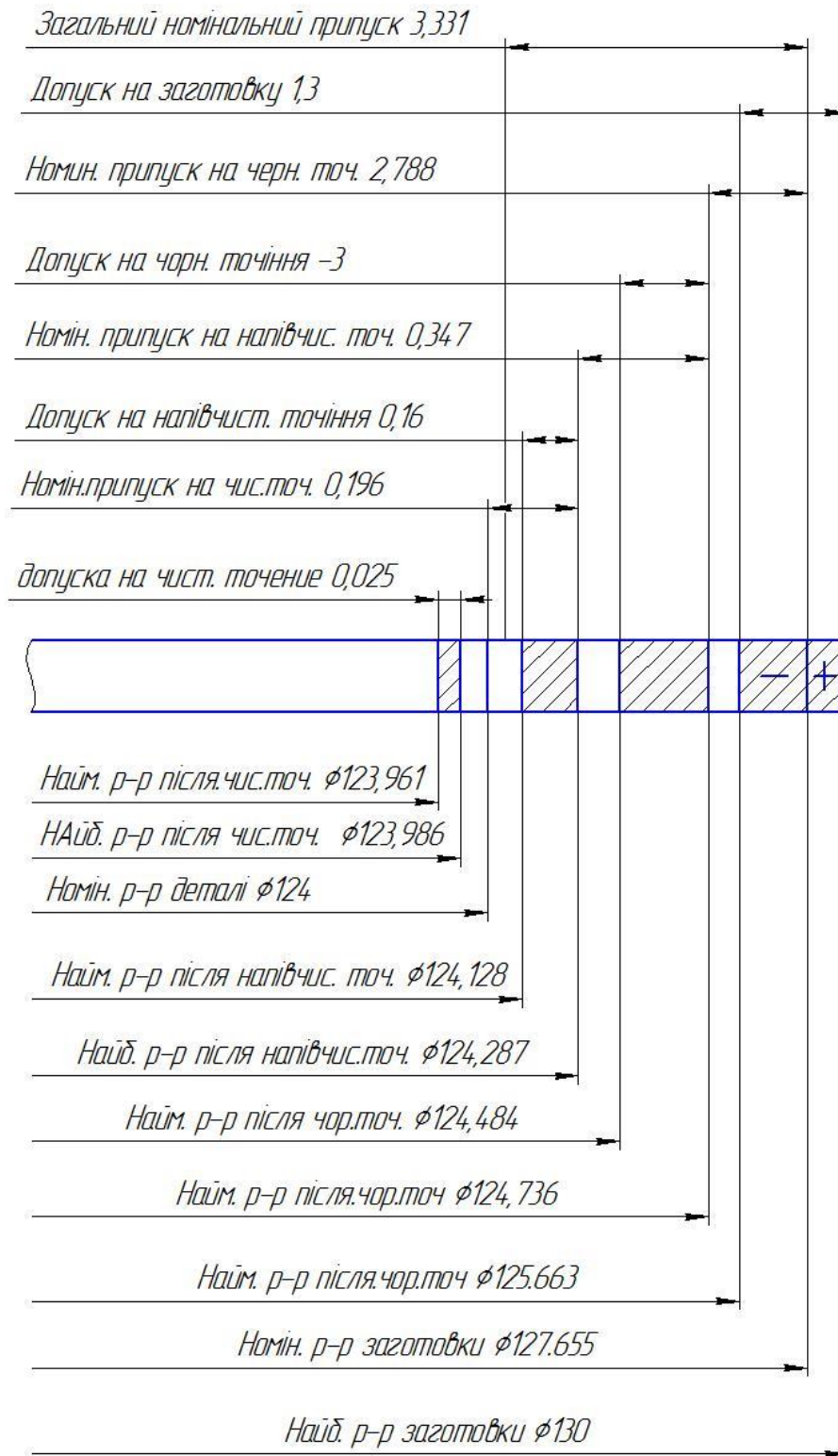


Рисунок 3.2- Схема розташування допусків і припусків на оброблення поверхні  $\phi 124_{-16}$  заготовки ролика

На основі такого підходу ми виконуємо розрахунок операційних припусків і допусків. Результати показано в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Операційні припуски і допуски

Параметр поверхні ролика	Технологічні переходи	Допуск	Операційний припуск	Міжопераційний розмір
Ø124h10	Заготовка	-	-	Ø 130
	Точіння <i>чорнове</i>	0,1	2x1,0	Ø 130 <sub>-0,1</sub>
	<i>напівчистове</i>	0,4	2x0,2	Ø126 <sub>-0,4</sub>
	<i>чистове</i>	0,16	2x3,30	Ø124 <sub>-0,16</sub>
Ø120f9	Заготовка	1,0	-	Ø 121
	Точіння <i>чистове</i>	0,02	-	Ø 120
Ø75H9	Заготовка	0	-	-
	Свердління	0,52	2x5,2	Ø 25 <sup>+0,52</sup>
	Розточування <i>напівчистове</i>	0,74	2x7,4	Ø 72 <sup>+0,74</sup>
	Розточування <i>чистове</i>	0,088	2x0,60	Ø 75 <sup>+0,062</sup> <sub>-0,15</sub>
Ø84H9	Заготовка	-	-	-
	Розточування <i>чорнове</i>	0,2	2x0,2	Ø 78,8 <sub>-0,2</sub>
	<i>чистове</i>	0,1	2x8,5	Ø 84 <sub>-0,1</sub>
M70	Заготовка	3,0	-	-
	Розточування <i>чорнове</i>	0,25	2x6	Ø 43,5 <sub>-0,25</sub>
	<i>напівчистове</i>	0,088	2x2,5	Ø 70 <sup>+0,062</sup> <sub>-0,15</sub>
	<i>чистове</i>	0,1	2x3,5	Ø 70

### 3.6 Розмірний аналіз технологічного процесу

Як відомо, головне завдання розмірного аналізу технологічного процесу це визначення проміжних і остаточних технологічних розмірів і допусків на них для оброблюваної заготовки [19]. Розмірний аналіз виконують на основі креслення ролика в такій послідовності:

- нумерація вибраних поверхонь ролика;
- ідентифікація і нумерація конструкторських розмірів;
- визначення схеми реалізації процесу оброблення ролика;
- синтез графу і виявлення технологічних розмірних зв'язків;
- розрахунок елементів розмірних ланцюгів;
- визначення технологічних розмірів та їх граничних відхилень.

Ми проводимо розмірний аналіз у відповідності з вищезазначеною послідовністю.

Ми здійснюємо розрахунок лінійних розмірів довжини поверхонь, отриманих в результаті токарного оброблення (рис. А.1, додаток А).

Для цього ми виявляємо технологічні розміри і розробляємо розмірні ланцюги з використанням теорії графів.

Як відомо, граф – це фігура, що містить дуги або ребра, що з'єднують відповідні вершини графа. Поверхні заготовки і ролика ми позначаємо вершинами, які з'єднані ребрами. Таким чином, креслення ролика з конструкторськими і технологічними розмірами ми описуємо у вигляді двох поєднаних дерев. Такий поєднаний граф дозволяє в закодованій формі проілюструвати геометричну структуру технологічного процесу оброблення заготовки. Граф комплексу розмірів для даної заготовки нами представлено на рисунку 3.3.

Кожен найкоротший замкнутий контур графа розмірів являє собою технологічний розмірний ланцюг. Ми будуємо відповідні розмірні ланцюги, зображені на рисунку 3.4.

Операційні допуски ми визначаємо на основі урахування економічної точності методу оброблення за довідником або за результатами розрахунку розмірних ланцюгів. Ми приймаємо допуски і відхилення розмірів заготовки за відповідними на їх виготовлення стандартами.

Ми визначаємо операційні розміри з допусками шляхом нарощування допусків і припусків, починаючи з останньої операції та закінчуючи першою для заготовки.

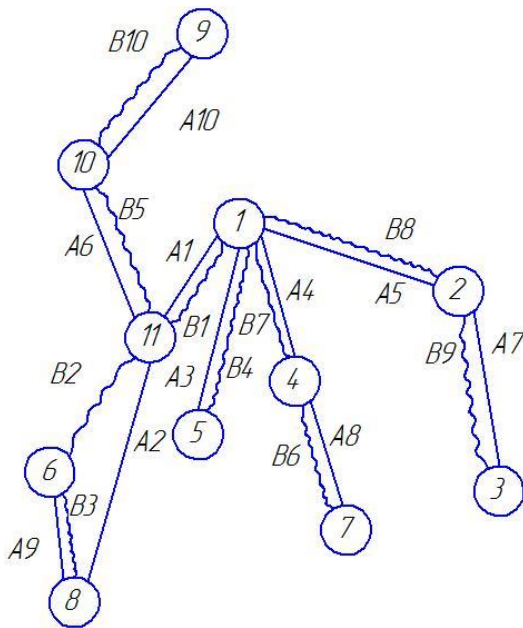


Рисунок 3.3– Граф розмірів заготовки ролика

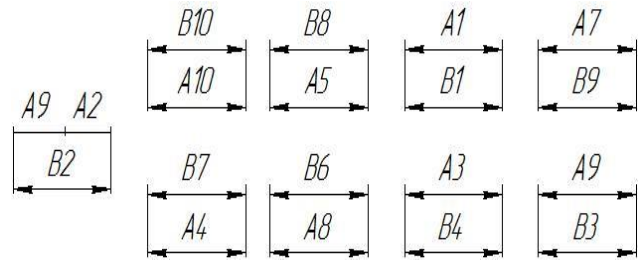


Рисунок 3.4 – Схема розташування технологічних розмірних ланцюгів заготовки ролика

Ми розраховуємо мінімальні припуски розрахунково-аналітичним методом або на основі табличних даних, наведених в довідковій літературі [19].

Приклад результатів розмірного аналізу одного розміру для визначеного плану процесу виготовлення ролика нами наведено в таблиці 3.4.

Ми визначаємо середній допуск  $T_{sr}$  за формулою:

$$T_{sr} = \frac{T_{\Delta}}{nk}, \quad (3.12)$$

де  $T_{\Delta}$  – допуск замикаючої ланки;

$n_k$  – кількість технологічних ланок у розмірному ланцюгу.

$$T_{sr} = 0,2 / 3 = 0,06; \quad T_{\Delta A2} = 10h \ 14 = 10_{-0,36}, \quad T_{B2} = T_{10h14} - 0,2 = 0,36 - 0,2 = 0,16; \\ B_2 = 30 - 10 - 10,9 = 9,8;$$

Потім ми визначаємо граничні відхилення за формулами:

$$ESA2\Delta = \sum ES^{y^6} - \sum EI^{y^m}, \quad EIA2\Delta = \sum EI^{y^6} - \sum ES^{y^m}. \quad (3.13)$$

$$0 = ESB2 - EIB4 - EIB3; \quad 0 = ESB2 - 0; \quad ESB2 = 0; \quad -0,36 = EIB2 - ESB3; \quad EIB2 = -0,36 + ESB3; \\ EIB2 = -0,36 + 0,2 = -0,16; \\ EIB2 = 9,6_{-0,16}$$

### **3.7 Вибір технологічного пристосування**

Ми застосовуємо пристосування, що забезпечують необхідну точність оброблення ролика і дозволяють досягати найбільшої продуктивності і економічності, безпеки в роботі.

Для забезпечення необхідної концентричності поверхонь заготовку ми плануємо закріплювати в універсальному токарному патроні фірми Röhм.

На програмно-комбінованій операції деталь може встановлюватись в універсально-складальному пристосуванні і фіксуватись за допомогою відповідного механізму.

### **3.8 Вибір різального і допоміжного інструментів**

Ми виконуємо вибір різального та допоміжного інструментів з урахуванням рекомендацій фірми Sandvik Coromant UK.

У технологічному процесі ми використовуємо такі різальні пластини:

CCMT-09T308-WM;

ISOWWMT040204-KF3225;

ISO DCWT 07 02 04-PM 4335 та інші.

Ми використовуємо у технологічному процесі такі державки інструментів:

C5-SCLC R – 35060-09;

C5-LF123V20CE-040B ;

ISOA10K-04SWLPL;

CoroDrill 860.1-0809-028A1-PM 2534 Ø25, IT8-10, Ra 1-2 мкм;

CoroDrill 860.1-0809-028A1-PM 2534 Ø72, IT8-10, Ra 1-2 мкм;

SVHBR 2525M16;

CoroDrill870-2090-20-PM ISO 870-2000-20L25-3 ISO 870-2000-20-MM 2234 та інші.

Ми зводимо результати вибору інструментів у таблицю А.2. Вона наведена у додатку А.

### **3.9 Засоби технічного контролю розмірів ролика**

У технологічному процесі виготовлення ролика ми використовуємо верстати з ЧПК. Завдяки цьому точність розмірів забезпечується технологічно без використання засобів активного контролю. Основними вимірювальними інструментами є штангенциркулі ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166-80 та ШЦ-I-125-0,05ГОСТ 166-80, мікрометр МК 100-1 ГОСТ 6507-90 і калібр-скоба ГОСТ 14810-69.

### **3.10 Визначення режимів різання**

Розрахунок оптимальних параметрів різання в сучасному виробництві варто проводити за допомогою передових програмних засобів. У цьому контексті важливо зазначити кілька програм, які надають зручні та ефективні інструменти для розрахунку режимів різання:

EdgeCAM: Цей програмний продукт вражає своєю потужною відкритою базою даних ріжучих інструментів, де знаходяться всі необхідні характеристики для визначення оптимальних режимів різання.

SecoCut: Ця програма містить комплекс рекомендацій, які сприяють вибору оптимальних параметрів різання, таких як подача, швидкість, потужність, момент тощо. Заснована на базах даних інструментів і матеріалів, SecoCut надає корисну інформацію для точних розрахунків.

CATIA (Computer Aided Three-dimensional Interactive Application): Система високого рівня CATIA вражає своєю можливістю імітації складних технологічних процесів на основі розрахованих режимів різання. Це забезпечує точність та надійність розрахунків в умовах реального виробництва.



Зазначимо, що провідні виробники ріжучого інструменту, такі як Sandvik Coromant і Dormer, розробили низку сервісів для розрахунку режимів різання. Наприклад, компанія Sandvik Coromant реалізувала безкоштовну інтерактивну програму "Розрахунок режимів різання" ([www.coroguide.com/CuttingDataModule/CDMMainMenu.asp?Lang=RUS&Metric=metric](http://www.coroguide.com/CuttingDataModule/CDMMainMenu.asp?Lang=RUS&Metric=metric)). Крім того, перспективною є локальна версія програми, адаптована для смартфонів iPhone і OS Android.

Використання цих програмних продуктів сприяє не лише точним розрахункам, але і підвищує ефективність та продуктивність виробничих процесів, побудованих на використанні спеціальних інструментів згаданої фірми.

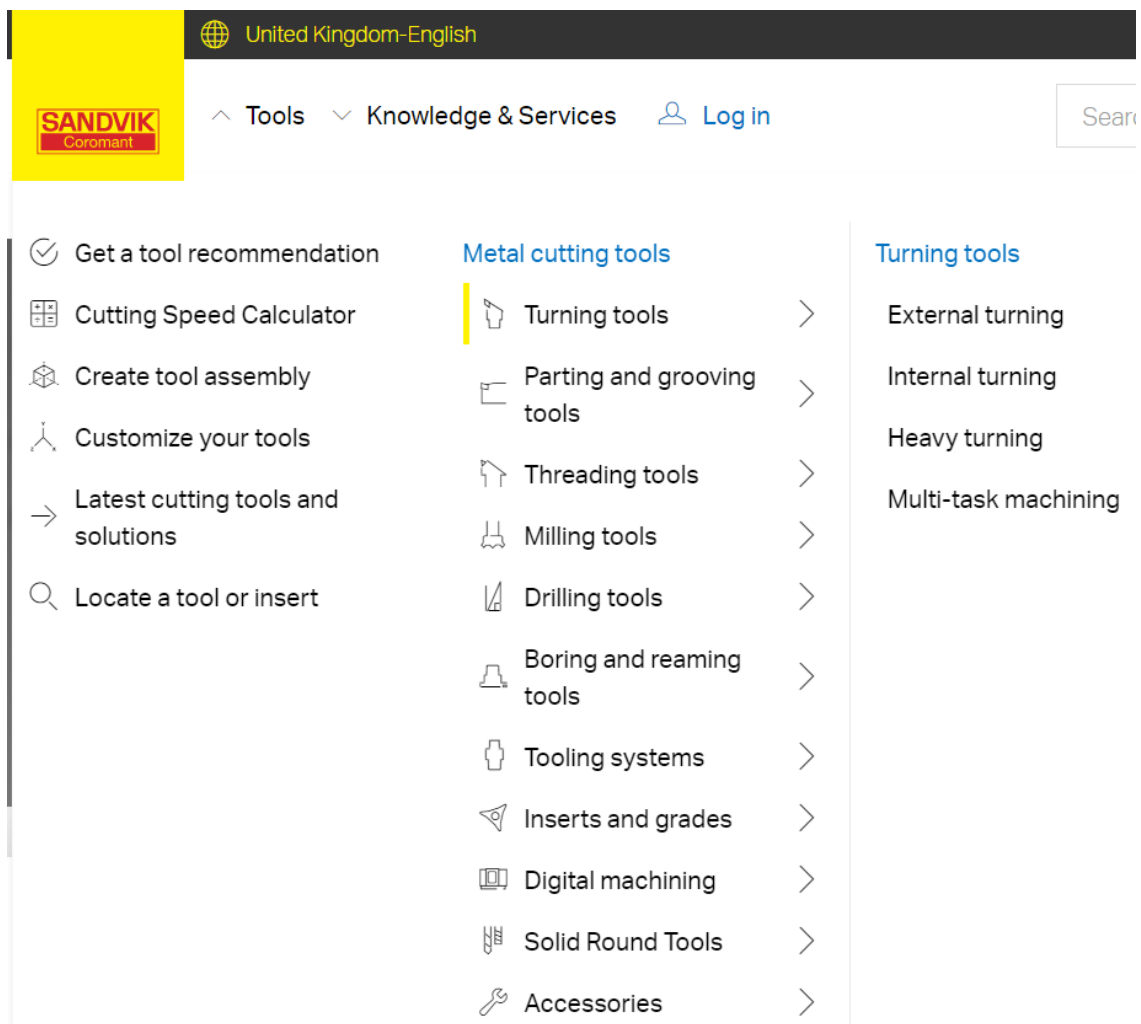


Рисунок 3.5 – Вікно сайту фірми Sandvik Coromant для вибору виду технологічної операції

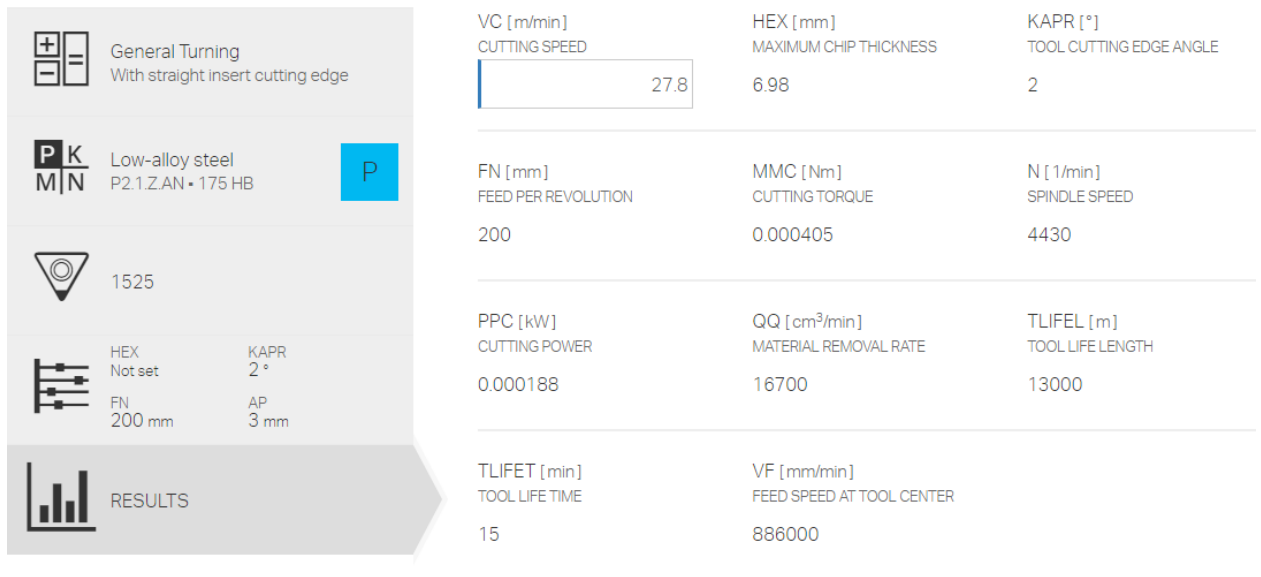


Рисунок 3.6 – Діалогове вікно розрахунку режимів різання

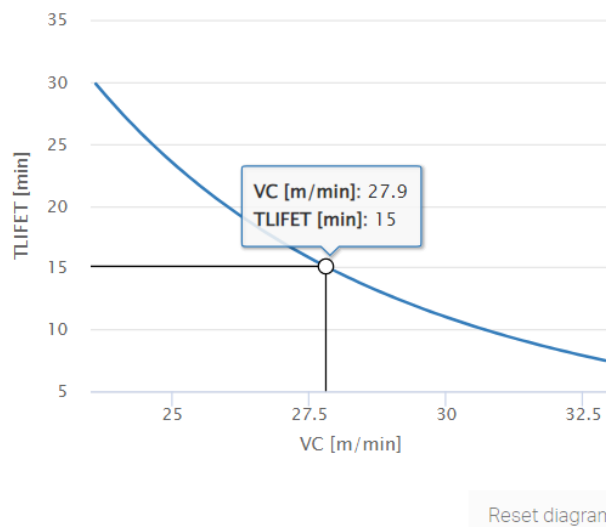


Рисунок 3.7 – Графічна ілюстрація показника режимів різання

Ми виконаємо розрахунок режимів різання на обробку поверхні  $\text{Ø}124_{+0.039}$ . Для досягнення необхідних розмірів і параметрів якості поверхні процес механічного оброблення включає етапи чорнового оброблення, напівчистового оброблення та чистове оброблення.

Технологічне устаткування SPINNER TC 600 75 MC-ID24975, ріжучий інструмент: державка DSSNR 2020K 12 - SNMG 12 05 09-MF 4335, твёрдосплавна пластина з кутом у плані  $\varphi = 55^{\circ}$ .

Ми розраховуємо режими різання аналітичним методом на основі

використання формул та необхідних коефіцієнтів, які наведені у праці [20].

Чорнове точіння.

Параметри оброблення:  $t = 6$  мм,  $S = 0,35$  мм/об.

Ми знаходимо швидкість різання (м/хв) за формулою [20]:

$$V = \frac{Cv}{T^{m \cdot t^x \cdot S^y}} \cdot Kv, \quad (3.14)$$

де

$$T = 60 \text{ хв}; Cv = 200, x = 0,20, y = 0,36, m = 0,65, K_{mv} = 1 \cdot (200/580)^1 = 0,33, \\ K_{nv} = 0,9, K_{uv} = 1,0. Kv = 0,33 \cdot 0,9 \cdot 1,0 = 0,312.$$

Тоді

$$V = \frac{200}{60^{0,65} \cdot 6^{0,20} \cdot 0,35^{0,36}} \cdot 0,312 = 8,28 \text{ об/хв}$$

Ми розраховуємо частоту обертання шпинделя верстата, потужність різання та тангенціальну складову сили різання

$$n := \frac{1000 \cdot v}{3,14 \cdot d}, \quad (3.15)$$

$$n = \frac{1000 \cdot 8,28}{3,14 \cdot 1124} = 20,24 \text{ мм/об}$$

$$N := \frac{P_z \cdot v}{1020 \cdot 60}, \quad (3.16)$$

$$P_z := 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S^y \cdot v^n \cdot K_p \quad (3.17)$$

де

$$C_p = 320; x = 2,0; y = 1,0; n = 0; K_p = K_{mp} \cdot K_{fp} \cdot K_{gp} \cdot K_{lp} \cdot K_{rp};$$

$$K_{mp} = 1, K_{fp} = 0,9, K_{gp} = 1, K_{lp} = 1, K_{rp} = 1,0.$$

Таким чином,  $K_p = 0,92$ .

$$P_z = 10 \cdot 300 \cdot 6^2 \cdot 0,39^1 \cdot 8,27^0 \cdot 0,92 = 37488 \text{ Н}$$

$$N = \frac{37488 * 8,27}{1020 * 60} = 5,1 \text{ кВт}$$

Із отриманих даних ми бачимо, що потужність з вибраними режимами різання не перевищує потужність приводу верстата (6,3 кВт).

Напівчистове оброблення.

$t = 2,0 \text{ мм}; S = 0,32 \text{ мм/об}; T = 60 \text{ хв}; C_v = 400; x = 0,20; y = 0,30;$   
 $m = 0,25; K_v = 0,34.$

$$V = \frac{400}{60^{0,5} * 2^{0,20} * 0,32^{0,30}} * 0,33 = 22,35 \text{ rpm}$$

$$n = \frac{1000 * 22,35}{3,14 * 126} = 20,90 \text{ мм/об.}$$

Значення емпіричних коефіцієнтів :

$$C_p = 205; x = 1,0; y = 0,75; n = 0; K_p = K_{mp} \cdot K_{\phi p} \cdot K_{\gamma p} \cdot K_{\lambda p} \cdot K_{\nu p}.$$

$$K_{mp} = 1,0; K_{\phi p} = 0,89; K_{\gamma p} = 1,0; K_{\lambda p} = 1,0; K_{\nu p} = 1,0; K_p = 0,89.$$

$$P_z = 10 * 204 * 2^2 * 0,31^1 * 22,35^0 * 0,89 = 2253 \text{ Н}$$

$$N = \frac{2253 * 22,35}{1020 * 60} = 1,08 \text{ кВт}$$

Ми бачимо, що потужність з вибраними режимами різання також не перевищує потужність приводу верстата.

**Чистове оброблення.** Глибина різання дорівнює припуску 2,85 мм, який доцільно зняти за 4 переходи. При цьому, на чистове оброблення припадає глибина  $t = 1,0 \text{ мм}$ , подача  $S = 0,225 \text{ мм/об}$ .

Швидкість різання

$$V = \frac{450}{60^{0,5} * 1^{0,20} * 0,225^{0,35}} * 0,33 = 32,49 \text{ rpm}$$

$$n = \frac{1000 * 32,49}{3,14 * 124} = 83,62 \text{ мм/об}$$

$T = 14 \text{ хв}; C_v = 120; x = 0.5; y = 0.2; m = 0.36; K_v = 1.0;$   
 де  $C_p = 360; x = 1.0; y = 0.75; n = -0.15; K_p = 0.9.$

Сила різання:

$$P_z = 10 * 350 * 1^2 * 0.225^1 * 32,49^{0.15} * 0.9 = 686,4 \text{ Н},$$

Частота обертання шпинделя верстата визначаємо так

$$N = \frac{686,4 * 32,56}{1020 * 60} = 0,362 \text{ кВт}$$

Ми представили результати розрахунку режимів різання на усі операції у таблиці А.2 в додатку А.

### 3.11 Технічне нормування технологічного процесу

Ми здійснюємо нормування технологічного процесу за кожною верстатною операцією методом технічного розрахунку за нормативами [20].

При цьому ми враховуємо у розрахунках параметри, які наведені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Параметри технічного нормування технологічного процесу

Позначення	Опис параметра нормування технологічного процесу	
$T_{sh.k.}$	норма штучно-калькуляційного часу	
$T_{sh}$	норма штучного часу	
$T_{n.z}$	норма підготувально-заключного часу на партію деталей	
$n$	розмір партії деталей	
$T_o$	час основний технологічний	
$T_d$		допоміжний
$T_{tec}$		технічного обслуговування робочого місця
$T_{org}$		організаційного обслуговування робочого місця
$T_b$		перерв

Ми виконуємо розрахунки за такими формулами.

Технічна норма часу незалежно від типу верстата і методу оброблення:

$$T_{ш.к} = T_{sh} + \frac{T_{н.з}}{n}, \text{ хв} \quad (3.18)$$

Таблиця 3.7 – Зведена відомість норм часу (в хв) по усіх операціях ТП

№	Назва операції	$T_o$	$T_d$	$T_{op}$	$T_{tec}$	$T_{тех} + T_{отд}$	$T_{sh}$	$T_{пз}$	$T_{ш.к.}$
005	Відрізна	18.89	0	39,09			20.47	0	22,03
010	Слюсарна	2.78	0	5,56	0,03	0,042	2.96	0	7,5
020	Токарне оброблення з ЧПК. Установ 1	124.7	22.04	272,91	0,032	0,014	146.26	12	158,38
	Токарне оброблення з ЧПК. Установ 2	34.02	14.12	81,22	0,02	0,03	48.67	12	47,09
025	Свердлильне оброблення з ЧПК	31.61	5.14	67,54	0,02	0,04	37.71	14	51,58
030	Слюсарна	19.06	0	39,93	0,03	0,02	20.02	0	19,26
035	Термічне оброблення (нанесення покриття)	4.13	0	8,26	0,02	0,02	4.37	0.01	4,07
040	Мийна	4,21	0,5	8,24	0,04	0,02	4.25	0	4,88
045	Точіння напівчистове	2.36	0	5,04	0,02	0,01	2.25	0	3,29
	$\Sigma$	243,5	40,07	522,2	0,24	0,13	285,85	38,09	325,58

Норма штучного часу:

$$T_{sh} = T_o + T_d + T_{tec} + T_{org} + T_b, \quad (3.19)$$

Оперативний час операції:

$$T_{op} = T_o + T_d, \text{ хв.}, \quad (3.20)$$

Слід відзначити, що ми враховуємо в оперативному часі тільки частину допоміжного часу, що не перекривається. Ми розраховуємо часи у процентах від оперативного часу. Згідно нормативів, час технічного обслуговування не повинен перевищувати 6...8%, час організаційного обслуговування - 8...10%, а час перерв – 2,5%. Норми часу нами представлені у таблиці 3.7.

### **3.12 Проектування схем наладок**

Ми виконуємо проектування технологічних наладок, враховуючи такі вимоги. Ми зображуємо оброблювану заготовку в довільному масштабі для необхідної кількості проєкцій. Ми вказуємо на заготовці отримані розміри з граничними відхиленнями і шорсткістю. Ми прив'язуємо оброблювані поверхні до технологічних баз відповідними розмірами. На налагодження ми вказуємо напрямки робочих рухів різальних інструментів і заготовки, ріжучий інструмент в кінці робочого ходу і спосіб кріплення інструменту на верстаті. На вільному полі креслення ми вказуємо: назва операції, найменування і модель верстата, пристосування, ріжучий інструмент та режими оброблення. Розроблена схема наладки наведена на листі дипломної роботи.

### **3.13 Розрахунок верстатного устаткування для оброблення заготовки ролика на токарному верстаті моделі 16A20Ф3NCT**

#### **3.13.1 Опис початкових даних**

Точіння і розточування поверхонь заготовки ролика ми плануємо виконувати на токарному верстаті моделі 16A20Ф3NCT за два установи.

Максимальними силовими факторами, які виникають у процесі різання характеризується оброблення зовнішньої циліндричної поверхні деталі. Інструмент – це різець C5-SCLC R – 35060-09, з різальною пластиною CCMT-09T308-WM. Ескіз ролика з позначеними оброблюваними поверхнями зображено на рисунку А.2 додатку А. Серед усіх оброблюваних поверхонь граничний розмір має циліндрична поверхня  $D_1 = \varnothing 124_{-0,16}$ .

Режими різання:  $t = 1,2$  мм,  $S = 0,24$  мм/об,  $n = 305.36$  об/хв,  $T_{sh} = 4.85$  хв.  $P_z = 390$  Н. Матеріал ролика – сталь 40ХНМА ГОСТ 2590-06, а його маса - 4,8 кг. Річна програма випуску  $N = 220$  штук.

Схема базування – це подвійна напрямна та опорна (рисунок А.3 додатку А), яка може бути реалізована за прикладом базування циліндричних деталей класу “вал”. В цьому випадку перший елемент схеми базування позбавляє заготовку чотирьох ступенів вільності ( $R_z, R_y, S_y, S_z$ ), а другий обмежує заготовку одним ступенем вільності ( $S_x$ ). Для закріплення заготовки при обробленні на даному верстаті ми можемо використовувати трьох кулачковий патрон з пневматичним приводом.

### 3.13.2 Вибір принципової схеми пристосування

Задану виробничу програму ми можемо реалізувати із застосуванням одномісного пристосування.

Підтвердженням цього є виконання умови, у якій враховано кількість робочих змін  $n$ , виробничу програму  $N$  та величину штучного часу  $T_{sh} = 4,8$  хв [9]

$$T_{sh} \leq \frac{F_d \cdot n \cdot 60}{N},$$

$$5 \leq \frac{2100 \cdot 2 \cdot 60}{220}, \quad 4,8 \leq 1260.$$

Із формули ми бачимо, що витрати часу на даному етапі оброблення не перевершують фонду часу на виготовлення одного ролика, тобто поштучний час в цьому разі є меншим за величину такту випуску роликів.

### 3.13.3 Силовий розрахунок верстатного пристосування

Силовий розрахунок верстатного пристосування ми здійснюємо на



основі урахування граничного значення сили різання. Воно становить 390 Н.

У розрахунках ми враховуємо величину коефіцієнт запасу для компенсації можливих випадкових відхилень силових факторів від розрахованих значень

$$K = \sum_{i=0}^6 K_i,$$

де  $K_i$  - коефіцієнти  $K_1 - K_6$  які враховують стан базових поверхонь, зношення інструменту, ударне навантаження на інструмент, стабільність сил, що забезпечуються вибраним приводом, особливості розташування опорних точок при зміщенні заготовки під дією силових факторів.

Гарантований коефіцієнт запасу  $K_0 = 1,70$ ; а значення інших коефіцієнтів є такими  $K_1 = 1,0$ ;  $K_2 = 1,2$ ;  $K_3 = 1,12$ ;  $K_4 = 1,53$ ;  $K_5 = 1,1$ ;  $K_6 = 1,0$ .

Тому

$$K = 1,7 \cdot 1,0 \cdot 1,2 \cdot 1,12 \cdot 1,53 \cdot 1,1 \cdot 1,0 = 2,995$$

В процесі оброблення поверхні заготовки зі сторони різального інструменту сила різання (колова сила  $P_z = 390$  Н) виявляє силову дію на деталь, створюючи момент різання, який прагне повернути деталь навколо її поздовжньої осі (рис. 3.1).

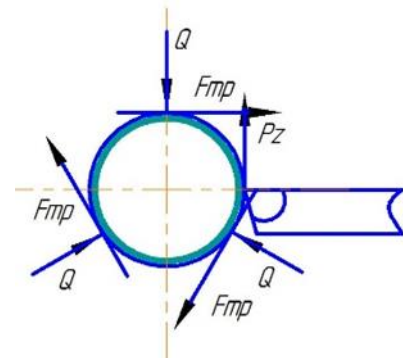


Рисунок 3.1– Схема дії силових факторів на деталь

Тому ми повинні визначити величину сили закріплення  $Q$  з метою забезпечення фіксації заготовки щодо патрона в процесі оброблення:

$$Q := \frac{K \cdot P_z \cdot D_1}{n \cdot f \cdot D},$$

де  $D$  – діаметр базової поверхні заготовки:  $D=130$  мм;

$n$  – кількість кулачків;

$f$  – коефіцієнт тертя:  $f = 0,16$ .

$$Q = \frac{2.995 \cdot 390 \cdot 124}{3 \cdot 0.16 \cdot 130} = 2386.85 \times 10^3$$

Далі ми визначаємо силу тяги, яку необхідно забезпечити на затискному механізмі, щоб створити необхідну силу закріплення при використанні вибраного затискного патрона. У розрахунках ми враховуємо силу закріплення  $Q$ , коефіцієнт тертя  $f_1$ , кут клину  $\beta$ , кут тертя  $\phi$  на похилій поверхні клину.

$$W := k_1 \cdot n \cdot Q \cdot \tan(\beta + \phi)$$

де  $k_1$  – коефіцієнт запасу патрона для кількості кулачків  $n$ ,  $k_1 = 1,05$ .

Ми отримаємо величину сили тяги, підставивши отримані значення

$$W = 1,05 * 3 * 2386.85 * \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{10}\right) = 37.82 * 10^3 \text{ Н}$$

Потім ми здійснюємо розрахунок силового приводу пристосування, що забезпечує необхідні закони зміни сили тяги і переміщення вихідної ланки приводу.

Ми визначаємо величину переміщення притискного елемента і ходу приводу виходимо з умови забезпечення вільного встановлення заготовки з урахуванням можливих відхилень її розмірів. При цьому ми повинні врахувати вплив величини сили закріплення і жорсткості затискного механізму та передбачити необхідний запас ходу, який компенсує знос його елементів і похибки виготовлення.

У цьому зв'язку ми визначаємо величину ходу притискного елемента

$$S_{(Q)} = \Delta_{\text{зап}} + \Delta + \frac{Q}{J} + \Delta S_{(Q)},$$

де  $\Delta S_{(Q)}$  – запас ходу плунжера затискного патрона.

$\Delta_{\text{зап}}$  – гарантований просвіт для вільного встановлення заготовки,  $\Delta_{\text{зап}} = 1,25$  мм;

$\Delta$  – відхилення розміру заготовки,  $\Delta = 0,85$  мм;

$J$  – жорсткість затискного механізму,  $J = 1000$  Н/мм;

$$\Delta S_{(Q)} = 1,25 + 0,85 + \frac{2386.85}{1000} + 0.2 = 4.572$$

На основі цього ми визначаємо величину ходу приводу

$$S_w = 4.572 * \frac{1}{\tan\left(\frac{\pi}{10}\right)} = 926 ,$$

### 3.13.4 Опис верстатного спорядження для оброблення заготовки ролика на токарно-фрезерному верстаті моделі 16A20Ф3НСТ

Для оброблення заготовки на токарному верстаті моделі 16A20Ф3НСТ ми можемо використовувати спорядження, яке вже поставляється із сучасною оснасткою різних типорозмірів. При виборі конкретної конструкції ми враховуємо розміри заготовки. Ми обрали токарний патрон фірми “Röhм” із наскрізним прохідним отвором. Для передачі затискного зусилля він використовує механізм клинового анкера, що дозволяє здійснювати закріплення деталей фланцевого типу та пруткові/трубні заготовки.

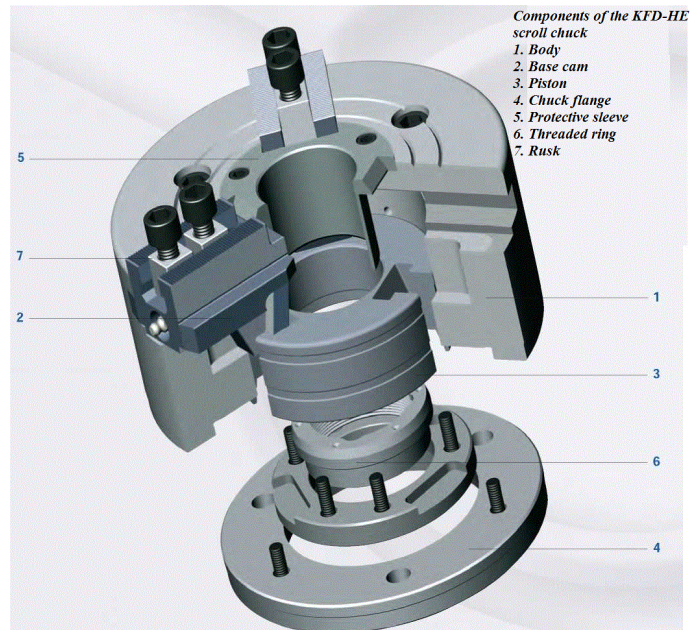


Рисунок 3.2 - Загальний вигляд вузла затискного патрону із наскрізним прохідним отвором

Загальний вигляд вузла затискного патрону та його розміри наведено на рис. 3.2 і 3.3. Ми бачимо із технічних характеристик патрона, що максимальне загальне затискне зусилля становить 110кН.

Затискне зусилля забезпечує достатньо необхідну величину для утримання заготовки при обробленні на даній операції  $110 \text{ кН} > 2,377 \text{ кН}$ .

Виробнича площа дільниці цеху для виготовлення виробу дорівнює  $50 \text{ м}^2$ .

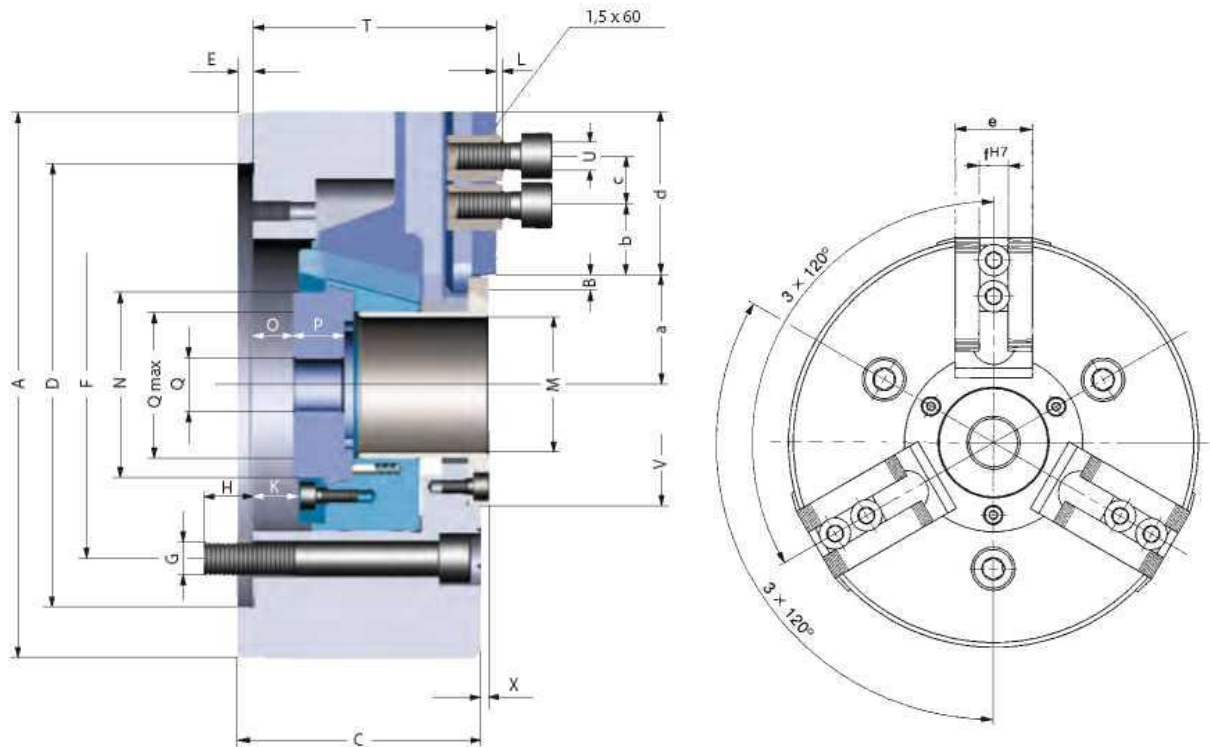


Рисунок 3.3 – Схема конструкції патрону з основними його геометричними параметрами

### 3.16 Розрахунок технологічної собівартості ролика

При розрахунку технологічної собівартості продукції ми враховуємо такі показники:

1. Виробнича програма випуску деталей на дільниці, дорівнює 220 шт./рік (для дрібносерійного типу виробництва);
2. Режим роботи є однозмінний, а фонд часу роботи устаткування  $\Phi_{д}=2000$  год.;
3. Фонд часу роботи робітників не перевищує 1820 год.
7. Верстатна місткість виготовлення ролика  $T_{sh} = 4,32$  год.
8. Верстатна місткість виготовлення усієї програми випуску роликів  $T_{sh} = 864$  год. або 1036,8 верстатних годин.
9. Загальна кількість верстатів на дільниці механічного оброблення - 2 шт.
10. Кількість виробничих робітників-верстатників дільниці - 2.

Розрахунок технологічної собівартості продукції ми здійснюємо за стандартно прийнятою методикою [15-16], яка наведена у додатку.

Результати розрахунку основної заробітної плати нами зведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Структурування розрахунку основної заробітної плати

№ оп.	Назва операцій	$T_{шт.-к.}$ хв	$T_{шт.-к.}$ год.	Розряд	Тариф, грн./год	Вартість, грн.
5	Заготівельна	19,9	0,36	3	34,02	12,30
10	Слюсарна	2,85	0,065		34,08	2,45
20	Токарна з ЧПК	145,02	2,35	5	55,03	125,08
25	Свердлильна з ЧПК	35,06	0,55		33,02	21,1
30	Слюсарна	3,80	0,07	3	33,55	3,074
35	Термооброблення	4,05	0,07	4	36,12	3,6
40	Мийна	2,35	0,045	3	32,8	2,07
45	Контрольна					
	Сума:	215,90	3,02			182,36

Таблиця 3.2 – Собівартість одиниці продукції

№з/п	Стаття калькуляції		Вартість, грн	
1	Вартість початкової заготовки з урахуванням реалізованих відходів		867,05	
2	Заробітна плата	виробничих робітників з урахуванням витрат по соціальному страхуванню і на додаткову заробітну плату	300,03	
3		наладчика в серійному виробництві	16,05	
4		амортизацію устаткування		346,3
5	Витрати на	ремонт устаткування	178	
6		експлуатацію та амортизацію спец. пристосувань		16,09
7		амортизацію і ремонт ріжучого інструменту, експлуатацію та амортизацію вимірювальних інструментів		-
8				-
9		силову електроенергію		150,02
10		допоміжні матеріали		0,0
11	Сумарна собівартість виготовлення ролика		1873,76	

Необхідно відзначити, що при розрахунку собівартості ми не враховуємо витрати на амортизацію і ремонт різального та вимірювального інструментів, на утримання виробничих приміщень, а допоміжні матеріали, так як вони змінюються незначно. На підставі розрахунку ми складаємо таблицю 3.2 собівартості продукції, в якій представлено результати розрахунку собівартості одиниці продукції.

Таким чином, собівартість виготовлення продукції становить 1,87 тис. грн.

### **3.15 Висновки до розділу**

В рамках розробки технологічного процесу виготовлення ролика ми здійснили вибір методу отримання заготовки, методів її оброблення, та необхідних технологічних і вимірювальних баз та технологічного устаткування, розробили структуру технологічного маршруту виготовлення ролика, провели розрахунок припусків на обробку і розмірний аналіз технологічного процесу, вибрали різальний і допоміжний інструменти, засоби технічного контролю розмірів ролика. Також нами проведено визначення режимів різання, виконано технічне нормування технологічного процесу та розроблення схем технологічних наладок.

На основі проведених розрахунків нами розроблена керуюча програма оброблення ролика на верстаті з ЧПК 16A20Ф3NCT, яка наведена у додатку В. Також, на основі правил з праці [21] розроблений комплект документів на технологічний процес виготовлення ролика ЖВМ 22.122.16. Він розміщений у додатку Д.

У розділі також проведено розрахунок верстатного устаткування для оброблення заготовки ролика на токарному верстаті моделі 16A20Ф3NCT. виконано розрахунок технологічної собівартості продукції. Ми встановили, що собівартість виготовлення ролика ЖВМ 22.122.16 становить 1,87 тис. грн.

## **4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

### **4.1 Пристрої захисного вимкнення, їх типи та принцип дії**

Захисно-вимикаючим пристроєм називається пристрій, який швидко (не більше як за 0,2 с) автоматично вимикає ділянку електричного кола при виникненні небезпеки ураження людини струмом [11-13, 23].

Основними частинами пристрою захисного вимкнення є прилад захисного вимикання і автоматичний вимикач.

Прилад захисного вимикання – це сукупність окремих елементів, які реагують на зміну певних параметрів електричного кола і дають сигнал на вимикання електричного кола. До основних елементів відносяться: датчик, підсилювач, коло контролю і автоматичний вимикач.

Датчик – це пристрій, що сприймає зміну параметра і перетворює його в відповідний сигнал. У якості датчиків, як правило, служать реле відповідних типів.

Підсилювач призначений для підсилення сигналу датчика, якщо він є недостатньо потужним.

Коло контролю служить для періодичної перевірки справності схеми захисного вимикаючого пристрою.

Автоматичний вимикач – пристрій, що служить для ввімкнення і вимкнення кіл, що знаходяться під захистом. Він повинен вимикати коло автоматично при надходженні сигналу від приладу захисного вимикання.

До допоміжних елементів відносяться сигнальні лампи, вимірювальні прилади (наприклад, омметр), що характеризують стан електропристрою тощо.

Кожен захисно-вимикаючий пристрій в залежності від параметру, на який він реагує, може бути віднесений до того чи іншого типу, в тому числі до типу пристроїв, що реагують на напругу корпусу відносно землі, струм

замикання на землю, напругу фази відносно землі, напругу нульової послідовності, струм нульової послідовності, оперативний струм тощо.

Захисно-вимикаючі пристрої, що реагують на напругу корпусу відносно землі, повинні знешкодити небезпеку ураження струмом при його виникненні на заземленому або зануленому корпусі. Ці пристрої є засобами захисту, що використовуються додатково до заземлення чи занулення. Принцип дії – швидке від'єднання від кола установки, якщо напруга її корпусу відносно землі виявиться вище певного гранично допустимого значення, при якому дотикання до корпусу стає небезпечним.

#### **4.2 Заходи пожежної безпеки на дільницях механоскладального цеху**

Холодна обробка металу в механічних та інших цехах потенційно не призводить до пожежі. Але в цих цехах зберігаються гас та мастильні матеріали, запас яких слід обмежувати до добової потреби і тримати у металевих шафах або ящиках. У тих цехах, де вогнебезпечна робота проводиться постійно, для цих матеріалів відводяться постійні спеціальні місця, оснащені необхідними засобами для гасіння пожеж.

Особливу увагу треба звертати на зварювальні роботи. При проведенні їх забороняється: користуватися несправною апаратурою, зварювати вироби, апарати і прилади, що перебувають під тиском рідини, пари й повітря, а також під електричною напругою; працювати в приміщеннях, де застосовуються або зберігаються легкозаймісті матеріали й рідини прокладати струмоведучі зварювальні проводи разом із газозварювальними шлангами та трубопроводами; зберігати у зварювальних кабінах одяг і рукавиці з слідами мастил, бензину і гасу.

Досить небезпечними в пожежному відношенні є малярні дільниці, в яких застосовуються фарби, лаки, емалі, та летючі розчинники. Під час роботи з пульверизаторами частина барвників розпилюються в повітрі і при певній концентрації утворює вибухонебезпечну суміш.



Малярні цехи, де робота проводиться з нітрофарбами, обладнують спеціальними витяжними вогнетривкими кабінами.

Вентиляція малярної дільниці, камер, кабін розраховується на повне видалення парів розпилювачів. Щоб запобігти іскроутворенню, кожух вентилятора обкладають зсередини листами кольорового металу. Електродвигуни вентиляторів, насоси, світильники та ін. повинні бути тільки вибухозахищені (у вибухонепроникному або спеціальному виконанні).

### **4.3 Оцінка стійкості роботи виробничого об'єкту в умовах надзвичайних ситуацій**

Стійкість роботи об'єкта – це його здатність випускати продукцію в надзвичайних ситуаціях у запланованому обсязі, необхідної номенклатури і відповідної якості, а у випадку впливу на об'єкт вражаючих факторів, стихійних лих та виробничих аварій – в мінімально короткі строки відновити своє виробництво.

Більш підготовленими до стійкої роботи будуть ті об'єкти, на яких будуть враховані усі небезпечні фактори, їх несприятливий вплив на виробництво і розроблять відповідні заходи. Завчасне проведення організаційних, агрохімічних, агротехнічних, інженерно-технічних, ветеринарно-санітарних, лісотехнічних, лісогосподарських, меліоративних та інших заходів максимально знизить результати впливу вражаючих факторів мирного і воєнного часу на людей, сільськогосподарських тварин і створить сприятливі умови для швидкої ліквідації наслідків надзвичайної ситуації.

Для розробки заходів підвищення і забезпечення стійкості роботи об'єктів у надзвичайних ситуаціях необхідно оцінити стійкість об'єкту проти впливу вражаючих факторів.

Вихідними даними для проведення розрахунків стійкості об'єкта до ураження є: максимальні значення параметрів можливих вражаючих факторів і характеристики елементів об'єкта [23]:

- відстань від цеху до сховища вуглеводних продуктів – 0,7 км;
- цех розташований до сховища по азимуту 270°;
- тип вуглеводного продукту – пропан;
- маса продукту – 300 т.;
- характеристика механічного цеху: будівля – залізобетон; верстати – середні; трубопроводи – на металевих естакадах, наземні;
- кабельні мережі – наземні.

Зони осередку ураження при вибуху газоповітряної суміші показано на рисунку 4.1.

Визначаємо максимально ймовірний надмірний тиск, що очікується при вибуху у районі розташування об'єкту

Зона I – зона детонаційної хвилі

$$R_1 = 17,5 \cdot \sqrt[3]{Q},$$

де  $Q = 300$  т. – маса вуглеводного продукту.

$$R_1 = 17,5 \cdot \sqrt[3]{Q} = 117,151 \text{ м};$$

$$\Delta P_1 = 1700 \text{ кПа};$$

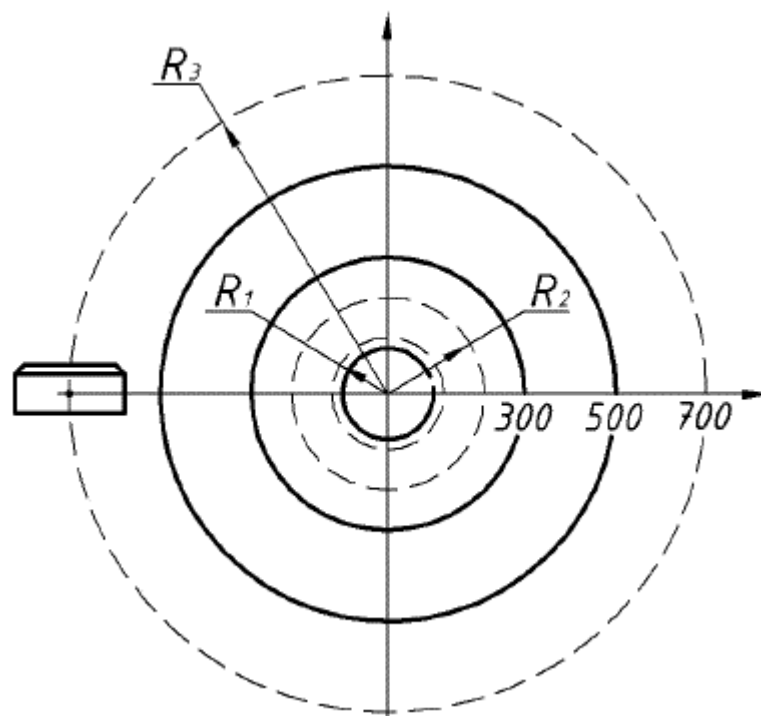


Рисунок 4.1 – Зони осередку ураження при вибуху газоповітряної суміші

Зона II – зона дії продуктів вибуху:

$$R_2 = 1,7 \cdot r_1 = 199,156 \text{ м};$$

$$\Delta P_2 = 1300 \cdot \left( \frac{r_1}{r} \right)^3 + 50 = 56,094 \text{ кПа.}$$

Зона III – зона дії повітряної ударної хвилі:

Визначимо відносну величину  $\Psi$ :

$$\Psi = 0,24 \cdot \frac{r}{r_1} = 1,434.$$

При  $\Psi \leq 2$ :

$$\Delta P_3 = \frac{700}{3 \cdot (\sqrt{1 + 29,8 \cdot \Psi^3} - 1)} = 27,686 \text{ кПа.}$$

Визначимо фактичний надмірний тиск:

$$\Delta P_\phi = \left( 1,05 \cdot \frac{\sqrt[3]{Q}}{r} + 4,3 \cdot \frac{\sqrt[3]{Q}}{r^2} + 14 \cdot \frac{Q}{r^5} \right) \cdot 100 = 1,043 \text{ кПа.}$$

Виділимо основні елементи об'єкту і визначимо їх ступені руйнування в залежності від  $P_{\phi \text{ lim}}$  ударної хвилі:

- механічний цех: 20... 30 кПа (середній);
- верстатний парк: 25... 35 кПа (середній);
- трубопроводи: 20... 30 кПа (слабкий);
- кабельні мережі: 10... 30 кПа (слабкий).

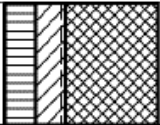
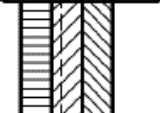
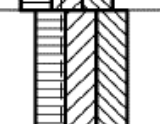

Порівнюючи  $P_{\phi \text{ lim}}$  (по найменшому показнику: механічний цех) з величиною 30 кПа визначимо, що об'єкт є досить стійким до ударної хвилі.

Результати розрахунків наведено у таблиці 4.1.

Висновок: межа стійкості об'єкту  $P_{\phi \text{ lim}} = 20$  кПа, що відповідає межі стійкості найуразливішого елемента об'єкту, тобто будівлі механічного цеху. На об'єкті від ударної хвилі очікується середній ступінь руйнування будівлі механічного цеху та обладнання і легкий ступінь руйнування для трубопроводів та кабельних мереж. Можливий збиток складе: для будівлі

механічного цеху – 45 %, для технологічного обладнання – 37 %, для трубопроводів – 27 %, для кабельних мереж – 27 %.

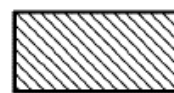
Таблиця 4.1 – Результати оцінки стійкості об'єкту до ударної хвилі

Елементи цеху та їх характеристики	Ступінь руйнування при $\Delta P_{\phi}$ , кПа	Межа стійкості елементу $\Delta P_{\phi \text{ lim}}$ , кПа	Збитки при $\Delta P_{\phi \text{ max}}$ , %	Примітка
	10 20 30 40 50 60 70			
Будівля: залізобетон		20	45	Межа стійкості об'єкту $\Delta P_{\phi \text{ lim}} = 20$ кПа
Технологічне обладнання: верстати середні		25	37	
Трубопроводи: на металевих естакадах		30	27	
Електромережа: кабельна наземна		30	27	

$\Delta P_{\phi \text{ max}}$  →



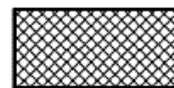
- слабкі руйнування



- сильні руйнування



- середні руйнування



- повні руйнування

#### 4.4 Висновки до розділу

У розділі висвітлено основні пристрої захисного вимкнення, їх типи та принцип дії, окреслено заходи пожежної безпеки на дільницях механоскладального цеху та проведено оцінку стійкості роботи виробничого об'єкту в умовах надзвичайних ситуацій.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблено методику розрахунку довжини спряження ролика ЖВМ 22.122.16 з опорним елементом у середовищі програмного продукту Wolfram Mathematica із використанням анонімних функцій.

2. Встановлено, що необхідна довжина спряження ролика ЖВМ 22.122.16 з валом повинна становити 60мм. На основі цього скоректовано креслення згаданої деталі.

3. Наступним етапом оптимізації конструкції ролика є перетворення його геометрії на основі методу генеративного дизайну. Результати досліджень особливостей використання такої методики у світі та методика вибору необхідного програмного продукту для її реалізації висвітлена у працях [24-26], написаних в співавторстві.

4. Спроектовано технологічний процес виготовлення ролика ЖВМ 22.122.16 зі сталі 40ХНМА ГОСТ 2590-06 для умов дрібносерійного виробництва на основі урахування наявного на машинобудівному підприємстві парку металорізального устаткування. Такий ТП базується на використанні токарного верстата з ЧПК 16A20Ф3NCT та свердлильного верстата АВАМЕТ VF-2SM. Також ми виконали вибір стандартного універсального верстаного пристосування сучасної конструкції— трикулачковий патрон KFD-M фірми RÖHM для закріплення заготовки ролика на згаданому верстаті з ЧПК. На основі проведених розрахунків у середовищі програмного продукту MasterCAM розроблена керуюча програма оброблення ролика на верстаті з ЧПК.

5. Встановлено, що собівартість виготовлення ролика ЖВМ 22.122.16 становить 1,874 тис. грн.

В роботі висвітлено основні пристрої захисного вимкнення, їх типи та принцип дії, окреслено заходи пожежної безпеки на дільницях механоскладального цеху та проведено оцінку стійкості роботи виробничого об'єкту в умовах надзвичайних ситуацій.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Creating a 3D model. Study guides for lab classes № 4 in the “CAM and CAE Systems of Machine Building Production“ course. Editors: Vasylykiv V., Danylchenko L., Radyk D. – Ternopil: Ternopil National Ivan Puluj Technical University, 2021. – 40 p.
2. Creating a parametric drawing in the automatic parameterization mode. Study guides for lab classes № 3 in the “CAM and CAE Systems of Machine Building Production“ course. Editors: Vasylykiv V., Danylchenko L., Radyk D. – Ternopil: Ternopil National Ivan Puluj Technical University, 2021. – 28 p.
3. Creating Parametric Drawing. Study guides for lab classes № 2 in the “CAM and CAE Systems of Machine Building Production“ course. Editors: Vasylykiv V., Danylchenko L., Radyk D. – Ternopil: Ternopil National Ivan Puluj Technical University, 2021. – 38 p.
4. Sketching by Non-parametric Drawing. Study guides for lab classes № 1 in the “CAM and CAE Systems of Machine Building Production“ course. Editors: Vasylykiv V., Danylchenko L., Radyk D. – Ternopil: Ternopil National Ivan Puluj Technical University, 2021. – 28 p.
5. Vasylykiv V., Danylchenko L., Radyk D. Technological methods of workpieces manufacturing. Metal Casting: Manual / V. Vasylykiv, L. Danylchenko, D. Radyk. Edited by L. Dzhydzhora. – Ternopil: Osadtsa U.V., 2021. – 203 p.
6. Vasylykiv V., Pylypets M., Danylchenko L., Radyk D. (2021) Use of computer-integrated technologies in training of engineering specialists. In: Ternopil National Ivan Puluj Technical University, Proceedings of the International Conference Advanced Applied Energy and Information Technologies, Ternopil, December 15-17, 2021, pp. 74-80.
7. Vasylykiv V.V. Technologies of workpieces manufacturing by casting: manual / V.V. Vasylykiv, L.M. Danylchenko, D.L. Radyk. – Ternopil : Published TNTU named after Ivan Puluj, 2023. – 492 p.
8. Боженко Л. І. Технологія виробництва заготовок у машинобудуванні. Київ: НМК ВО, 1990. 264 с.
9. Дичковський М. Г. Технологічна оснастка. Проектно-конструкторські розрахунки пристосувань: навч. посіб. Тернопіль: ТДТУ,

2001. 277 с.

10. Експериментальні дослідження в технології машинобудування. Навчальний посібник з дисципліни ”Наукові дослідження і теорія експерименту”. Уклад. Васильків В.В., Радик Д.Л. – Тернопіль: Видавництво ТНТУ імені Івана Пулюя, 2012. – 386 с.

11. Жидецький В.Ц. Практикум із охорони праці : навчальний посібник. Львів: Афіша, 2000. 349 с.

12. Жидецький В.Ц., Джигирей В. Ц., Мельников О. В. Основи охорони праці : навчальний посібник. Львів: Афіша, 2000. 350 с.

13. Запорожець О. І. Основи охорони праці: Підручник / О. І. Запорожець, О. С. Протоєрейський, Г. М. Франчук, І. М. Боровик. Київ : Центр учбової літератури, 2009. 264 с

14. Інженерний аналіз в Ansys Workbench. Методичний практикум з дисципліни “Комп’ютерне моделювання процесів обробки матеріалів”. Укладачі: Васильків В.В., Радик Д.Л., Данильченко Л.М., Дивдик О.В. – Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. – 66 с.

15. Методичні вказівки для практичного заняття №1 на тему: Методи визначення ефективності інженерних рішень з дисципліни “Ефективність інженерних рішень” / Укладачі: Василь Васильків, Лариса Данильченко, Дмитро Радик, Ігор Ярема. — Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2023. — 25 с.

16. Методичні вказівки для практичного заняття №2 на тему: Оцінка ефективності та обґрунтування методу отримання заготовок з дисципліни “Ефективність інженерних рішень” / Укладачі: Василь Васильків, Лариса Данильченко, Дмитро Радик, Ліліана Джиджора. — Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2023. — 29 с.

17. Обробка результатів експериментальних досліджень математичними методами. Методичний посібник / Уклад. Васильків В.В., Радик Д.Л., Романовський Р.М. – Тернопіль: Вид-во ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. – 74 с.

18. Павлице В.Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин: Підручник. – К.: Вища шк., 1993. – 556 с.

19. Паливода Ю. Є., Кухарський О. М. Визначення припусків розрахунково-аналітичним методом, Тернопіль, 2003. 81 с.
20. Паливода Ю.Є., Дячун А.Є., Лещук Р.Я. Інструментальні матеріали, режими різання і технічне нормування механічної обробки: навчальний посібник. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2019. 240 с.
21. Пилипець М. І. Правила заповнення основних форм технологічних документів: навч.-метод. посіб. / Уклад. Пилипець М. І., Ткаченко І. Г., Левкович М. Г., Васильків В. В., Радик Д. Л. Тернопіль : ТДТУ, 2009. 108 с.
22. Терміни та визначення в технічній творчості та наукових дослідженнях. Методичний посібник / Уклад. Пилипець М.І, Васильків В.В., Радик Д.Л. – Тернопіль: Вид.-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2011. – 256 с.
23. Шоботов В. М. Цивільна оборона: Навч. посіб. Київ : Центр навчальної літератури, 2006. 438 с.
24. Vasylykiv V., Ryskalchuk S., Makovynskyi N., Punchuk V. The use of the analytic hierarchy process method for selecting software products to implement generative design technologies for products in mechanical engineering. Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 6-7 грудня 2023 р., м. Одеса. – Одеса: 2023. С. 45-47.
25. Vasylykiv V., Kornev O., Punchuk V., Ryskalchuk S., Paraschuk V., Hrytsyna A. Analysis of the dynamics of patent flows concerning the advancement of generative design technologies. Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 6-7 грудня 2023 р., м. Одеса. – Одеса: 2023. С. 41-43.
26. Vasylykiv V., Makovynskyi N., Punchuk P., Ryskalchuk S., Kornev O. Monitoring the use of software products for generative design. Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 6-7 грудня 2023 р., м. Одеса. – Одеса: 2023. С. 43-45.