

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МАШИНОБУДІВНИЙ
(повне найменування інституту, факультету)

ТЕХНОЛОГІЯ МАШИНОБУДУВАННЯ
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту (роботи)
перший (бакалаврський)
(ступінь вищої освіти)

на тему «Розроблення технологічного процесу виготовлення деталі
типу «Колесо зубчасте»»

Виконав: студент(ка) 4 курсу, групи М-112

Спеціальності 131 Прикладна механіка
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)
Технології машинобудування

	<u>КАРНАУХ І. В.</u> (ПРИЗВИЩЕ та ініціали)
Керівник	<u>ПУХАЛЬСЬКА Г.В.</u> (ПРИЗВИЩЕ та ініціали)
Рецензент	<u>МАТЮХІН А.Ю.</u> (ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет Машинобудівний

Кафедра Технологія машинобудування

Ступінь вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 131 Прикладна механіка

(код і найменування)

Освітня програма (спеціалізація) Технології машинобудування

(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Сергій ДЯДЯ

«_____» _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

КАРНАУХ Іван Віталійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) «Розроблення технологічного процесу виготовлення деталі типу «Колесо зубчасте»»

керівник проєкту (роботи) Пухальська Гульнара Вікторівна, к.т.н., доцент

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «12»05.2026 року №233

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) робоче креслення деталі, річна програма випуску N=5000шт

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1 Технологічна частина, 2 Конструкторська частина, 3 Організаційна частина планування ділянки 4 Оцінка очікуваної економічної ефективності розробки, 5 Охорона праці

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

Креслення деталі, заготовки, плакат моделей деталі і заготовок, маршрут виготовлення деталі, графічне зображення етапів підготовки управляючої програми та розрахунків на міцність, креслення робочого пристосування.

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-3	ПУХАЛЬСЬКА Г.В. доцент		
4	ПУХАЛЬСЬКА Г.В. доцент		
5	ПУХАЛЬСЬКА Г.В. доцент		
Нормоконтр.	ДЯДЯ С.І., зав. каф.		

7. Дата видачі завдання « 1 » травня 2026 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Технологічна частина	8.05.2026	
2	Конструкторська частина	11.05.2026	
3	Розробка планування ділянки	15.05.2026	
4	Оцінка очікуваної економічної ефективності розробки	18.05.2026	
5	Оформлення пояснювальної записки, креслень, технологічних карт	22.05.2026	
6	Нормоконтроль і рецензія	29.05.2026	
7	Захист дипломного проєкту	09.06.2026	

Студент(ка)

_____ Іван КАРНАУХ
(підпис) ((Ім'я ПРІЗВИЩЕ))

Керівник проєкту (роботи)

_____ Гульнара ПУХАЛЬСЬКА
(підпис) ((Ім'я ПРІЗВИЩЕ))

РЕФЕРАТ

ПЗ: 92 с., 8 табл., 16 рис., 2 дод., 12 джерел.

ЗУБЧАСТЕ КОЛЕСО, ЗАГОТОВКА, ШТАМПУВАННЯ, КРИВОШИПНИЙ
ГАРЯЧЕШТАМПУВАЛЬНИЙ ПРЕС, ВЕРСТАТ, ЧИСЛОВЕ ПРОГРАМНЕ
КЕРУВАННЯ, КЕРУЮЧА ПРОГРАМА, СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО
ПРОЄКТУВАННЯ, ТОКАРНА ОПЕРАЦІЯ, СВЕРДЛИЛЬНА ОПЕРАЦІЯ.

Об'єкт дослідження – зубчасте колесо.

Мета роботи – розробка технологічного процесу виготовлення зубчастого колеса.

Метод дослідження – розрахунково-аналітичний.

В дипломній роботі за рахунок використання сучасних верстатів з ЧПК і продуктивного обладнання та оснастки розроблено технологічний процес виготовлення зубчастого колеса, передбачено економічні ризики виробництва, розраховано режими різання, норми часу, розроблено операцію з ЧПК, спроектовано робоче та запропоновано контрольне пристосування, досліджено міцнісні характеристики деталі, виконано розрахунок щодо організаційних питань і кількості технологічного обладнання та робітників на ділянці, передбачені заходи щодо безпечної роботи персоналу.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	7
ВСТУП	8
1 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	10
1.1 Опис деталі відповідно до службового призначення	10
1.2 Вибір типу та форми організації виробництва	12
1.3 Вибір виду і способу отримання заготовки з економічним обґрунтуванням	14
1.4 Проектування технологічного маршруту виготовлення деталі «Колесо зубчасте»	19
1.4.1 Вибір технологічних баз	19
1.4.2 Проектування маршруту обробки поверхонь	21
1.4.3 Проектування технологічного маршруту виготовлення деталі	26
1.5 Розрахунок припусків і технологічних розмірів	27
1.6 Розрахунок режимів різання	32
1.7 Технічне нормування операцій	44
1.8 Розробка керуючої програми на операцію з ЧПК	49
2 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	53
2.1.1 Конструкція і принцип роботи пристосування.	53
2.1.2 Визначення похибки базування та закріплення. Розрахунок пристосування на точність.	55
2.1.3 Визначення необхідної сили затиску. Вибір приводу.	57
2.2 Проектування контрольного пристосування.	60
2.2.1 Конструкція і принцип роботи контрольного пристосування	60
2.3 Розрахунок на міцність деталі.	61
3 РОЗРОБКА ПЛАНУВАННЯ ДІЛЬНИЦІ	65
4 ОЦІНКА ОЧІКУВАНОЇ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБКИ АБО ЗАХОДІВ	69
5 ОХОРОНА ПРАЦІ	74

ВИСНОВОК	79
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	81
Додаток А. Технологічні карти	83

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ГКМ — горизонтально-кувальна машина

ЄОМ — електронна обчислювальна машина

ЗОР — змащувально-охолоджувальна рідина

КВМ — коефіцієнт використання матеріалу

КГШП — кривошипний гарячештампувальний прес

КЕ — скінченний елемент

КП — керуюча програма

НДС — напружено-деформований стан

ПЗ — пояснювальна записка

РТК — робоча технологічна карта

САПР — система автоматизованого проєктування

ТПП — технологічна підготовка виробництва

ЧПК — числове програмне керування

ВСТУП

Актуальність теми даної роботи зумовлена високою затребуваністю зубчастих передач у сучасному авіабудуванні, автомобілебудуванні та енергетичному машинобудуванні. Циліндричні зубчасті колеса є критично важливими компонентами трансмісій, що працюють в умовах значних динамічних навантажень. Від точності їх виготовлення та якості поверхневого шару залежить не лише ККД механізму, а й його надійність, довговічність та віброакустичні характеристики. Основним об'єктом дослідження у проекті є технологічний процес механічної обробки колеса зубчастого, що виготовляється із конструкційної легованої сталі 40Х. Вибір матеріалу обумовлений його високими механічними властивостями після відповідної термічної обробки, що забезпечує необхідну міцність та зносостійкість зубів. Важливим етапом проектування є техніко-економічне обґрунтування методу отримання заготовки. Порівняльний аналіз штампування на горизонтально-кувальних машинах (ГКМ) та кривошипних гарячештампувальних пресах (КГШП) дозволяє виявити найбільш раціональний шлях економії металу та зниження собівартості. Сучасна парадигма машинобудування вимагає інтегрованого підходу. Використання системи NX CAM для розробки фрезерних операцій та токарної обробки дозволяє реалізувати складні траєкторії руху інструменту, які було б важко або неможливо запрограмувати вручну. Водночас навички ручного програмування в кодах ISO залишаються фундаментальною базою, що дозволяє інженеру розуміти логіку роботи систем ЧПК та здійснювати точне налагодження верстатів. Окрему увагу в роботі приділено перевірним розрахункам на міцність. Застосування методу скінченних елементів у програмному комплексі NXCAE дозволяє візуалізувати напружено-деформований стан деталі під дією експлуатаційних навантажень. Метою бакалаврської роботи є розробка оптимальної операційної технології виготовлення зубчастого колеса із застосуванням сучасних засобів САПР. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити низку завдань, зокрема:

провести аналіз службового призначення та конструктивних особливостей деталі, обґрунтувати метод отримання заготовки на основі розрахунку коефіцієнта використання матеріалу та собівартості, розрахувати режими різання для токарної та свердлильно-фрезерної операцій з урахуванням характеристик сучасного різального інструменту, розробити траєкторії руху інструменту та сформувати керуючі програми у системі NX CAM, а також здійснити аналіз міцності деталі за допомогою скінченно-елементного моделювання в NXCAE.

1 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

1.1 Опис деталі відповідно до службового призначення

Зубчасте колесо ведене циліндричної передачі є одним із найвідповідальніших і найбільш складнонавантажених елементів сучасних механічних систем, що забезпечують передачу потужності та перетворення кінематичних параметрів обертального руху між паралельними валами. Функціональне призначення даної деталі в умовах експлуатації полягає у безперервній і кінематично точній передачі крутного моменту при суворому дотриманні заданого передавального відношення. Геометрія колеса показана на рисунку 1.1.

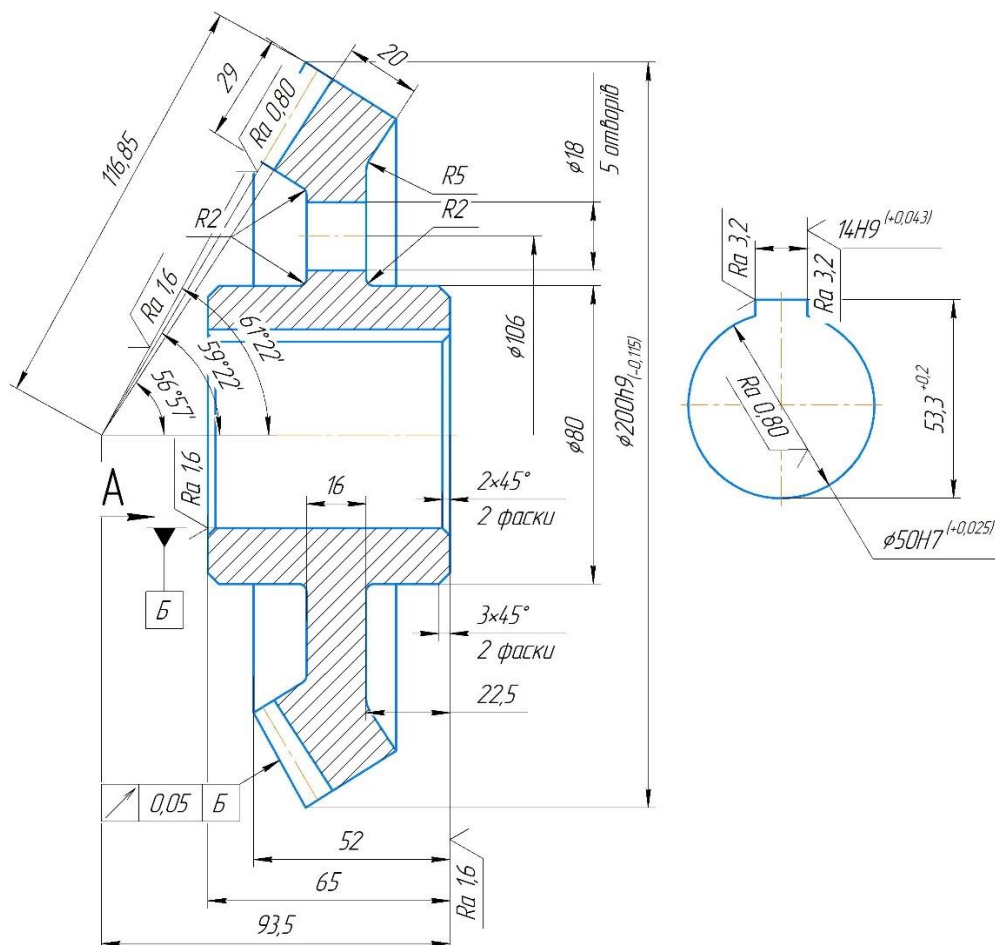


Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд колеса зубчатого

До матеріалу зубчастого колеса висувається комплекс суперечливих фізико-механічних вимог. З одного боку, поверхневий шар активних профілів зубів повинен володіти максимально високою твердістю та зносостійкістю для ефективного опору контактній втомі. З іншого боку, серцевина зуба та тіло колеса (диск, маточина) повинні характеризуватися високою пластичністю та ударною в'язкістю для забезпечення релаксації пікових динамічних навантажень та унеможливлення крихкого макроруїнування деталі. Для задоволення цих жорстких критеріїв як конструкційний матеріал обрано леговану сталь марки 40X. Дана марка належить до класу конструкційних сталей середньої прогартовуваності і є класичним рішенням для виготовлення поліпшуваних деталей машин, що працюють в умовах знакозмінних навантажень. Нормований хімічний склад сталі 40X наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 — Хімічний склад сталі 40X [1], %

Залізо (Fe)	Вуглець (C)	Хром (Cr)	Кремній (Si)	Марганець (Mn)	Нікель (Ni)	Мідь (Cu)	Сірка (S)	Фосфор (P)
Основа	0,36 – 0,44	0,80 – 1,10	0,17 – 0,37	0,50 – 0,80	не більше 0,30	не більше 0,30	не більше 0,035	не більше 0,035

Першим етапом формування властивостей є отримання заготовки методом гарячого об'ємного штампування на кривошипному гарячештампувальному пресі. Для гомогенізації структури та підготовки металу до лезової механічної обробки заготовка піддається попередній термічній обробці — поліпшенню. Цей процес включає нагрівання деталі до температури аустенізації в межах 840–860 °С, витримку для повного розчинення карбідів і наступне охолодження в маслі. Наступний високий відпуск при температурі 540–580 °С забезпечує розпад тетрагонального мартенситу з утворенням високодисперсної ферито-цементитної суміші — сорбіту відпуску. Отримана структура гарантує високу ударну в'язкість на рівні понад 800 кДж/м² та рівномірну твердість HB 210–240, що є оптимальним

для продуктивного різання твердосплавним інструментом з утворенням сегментної стружки, яка легко відводиться із зони обробки.

Після завершення комплексу чорнових і напівчистових механічних операцій, включаючи зубонарізання, деталь піддається остаточному поверхневому зміцненню.

Експлуатаційні властивості робочих евольвентних поверхонь зубів є визначальними для шумових характеристик, плавності роботи та ККД усієї передачі. Для досягнення високого ступеня точності після термічного зміцнення проводиться фінішна операція — профіleshліфування або обкатувальне зубошліфування. Шорсткість активних профілів не повинна перевищувати $Ra\ 0,8$ мкм, оскільки мікронерівності діють як мікроскопічні різці, що зрізають мастильну плівку і спричиняють абразивне зношування парного колеса. Крім того, наявність поперечних рисок на поверхні зуба є потужним концентратором напружень. Глибина западини (ніжка зуба), хоча й не бере участі в безпосередньому контакті, формує геометрію небезпечного перерізу. Відсутність підрізу ніжки зуба, плавність перехідної кривої та відсутність концентраторів напружень у вигляді слідів від інструменту є обов'язковими умовами запобігання втомному руйнуванню. Зовнішня циліндрична поверхня (поверхня вершин зубів) слугує вимірювальною базою для контролю товщини зуба по постійній хорді штангензубоміром і виготовляється за 11–12 квалітетом точності, а бічні торці зубчастого вінця є вільними поверхнями, вимоги до яких обмежуються загальною естетикою та відсутністю задирок.

1.2 Вибір типу та форми організації виробництва

Проектування високоефективного технологічного процесу механічної обробки деталі нерозривно пов'язане з обґрунтованим вибором типу та форми організації виробництва, оскільки саме ці фактори визначають стратегію

побудови всього виробничого циклу, визначають рівень його механізації, автоматизації, структуру технологічного обладнання, ступінь спеціалізації робочих місць та загальну економічну рентабельність випуску продукції. Відповідно до вихідних даних проектування, об'єктом виробництва є зубчасте колесо, маса якого становить 5,9 кілограма, а задана річна програма випуску дорівнює 5000 штук. Аналізуючи ці параметри з використанням нормативно-довідкової літератури для підприємств машинобудівного профілю, можна зробити однозначний висновок щодо типу виробництва. Для деталей дрібної та середньої масової групи, до яких належить виріб масою 5,9 кг (що знаходиться у діапазоні від 1 до 10 кг), річний обсяг випуску від 5000 до 50000 штук класифікується як великосерійне виробництво. Великосерійний тип виробництва характеризується обмеженою номенклатурою виробів, які виготовляються періодично повторюваними партіями великого розміру, при цьому за кожним робочим місцем закріплюється виконання однієї або кількох технологічних операцій.

Успішне функціонування потокового виробництва великосерійного типу висуває підвищені вимоги до технологічної оснащеності процесу. Враховуючи програму в 5000 штук, використання універсальних пристроїв з ручним затискачем є економічно недоцільним через значні втрати часу на встановлення та зняття деталі.

Кількість деталей в партії можна визначити за формулою (1.1) [2]:

$$n = \frac{a \cdot N}{\Phi} \quad (1.1)$$

де a – періодичність запуску (2 рази на тиждень);

Φ – кількість робочих днів на рік (250 днів).

$$n = \frac{2 \cdot 5000}{250} = 60 \text{ шт.}$$

1.3 Вибір виду і способу отримання заготовки з економічним обґрунтуванням

Об'єктом дослідження є ведене зубчасте колесо масою 5,9 кілограма, виготовлене з конструкційної легованої сталі 40Х. Зважаючи на високі контактні та згинальні навантаження, які діють на евольвентні профілі зубів у процесі експлуатації, використання литих заготовок є технологічно та конструктивно неприпустимим через їхню природну макроструктурну неоднорідність, наявність усадкових раковин і відсутність спрямованої волокнистої будови. Тому єдиним технічно правильним напрямком отримання заготовок для високонавантажених зубчастих передач є методи об'ємного пластичного деформування (кувальньо-штампувальне виробництво), які забезпечують сприятливе розташування волокон макроструктури конгруентно до зовнішнього контуру деталі, що багаторазово підвищує опір матеріалу втомному руйнуванню. Для забезпечення необхідної точності та продуктивності порівняльний аналіз здійснюється між двома методами гарячого об'ємного штампування: з використанням горизонтально-кувальної машини та кривошипного гарячештампувального преса.

Технологія штампування на горизонтально-кувальній машині базується на використанні різних матриць та деформуванні металу у взаємно перпендикулярних площинах, що дозволяє отримувати складні поковки з глибокими порожнинами та фланцями без утворення значного технологічного облою.

Альтернативним методом є гаряче штампування на кривошипному гарячештампувальному пресі, який характеризується високою жорсткістю станини та постійною, жорстко заданою траєкторією руху повзуна. Наявність у конструкції преса верхнього та нижнього виштовхувачів дозволяє радикально зменшити штампувальні ухили на внутрішніх і зовнішніх поверхнях поковки. Крім того, характер деформування металу на КГШП (поступове наростання зусилля без динамічного удару) забезпечує краще заповнення кутів гравюри

штампа, вищу точність геометричних розмірів та меншу висоту мікронерівностей штампованої поверхні. Це створює передумови для призначення мінімально необхідних припусків на чорнову лезову обробку.

Остаточне рішення щодо впровадження того чи іншого методу у виробничий процес базується виключно на результатах економічного розрахунку.

Призначаємо загальний припуск на обробку [2]:

Штамповка на ГKM: $z = 3,5$ мм на сторону,

Штамповка на КГШП: $z = 3$ мм на сторону,

Використовуючи САПР «NXCAM» визначимо вагу та об'єм заготовок для штамповки на ГKM (рис. 1.2) та для штамповки на КГШП (рис. 1.3).

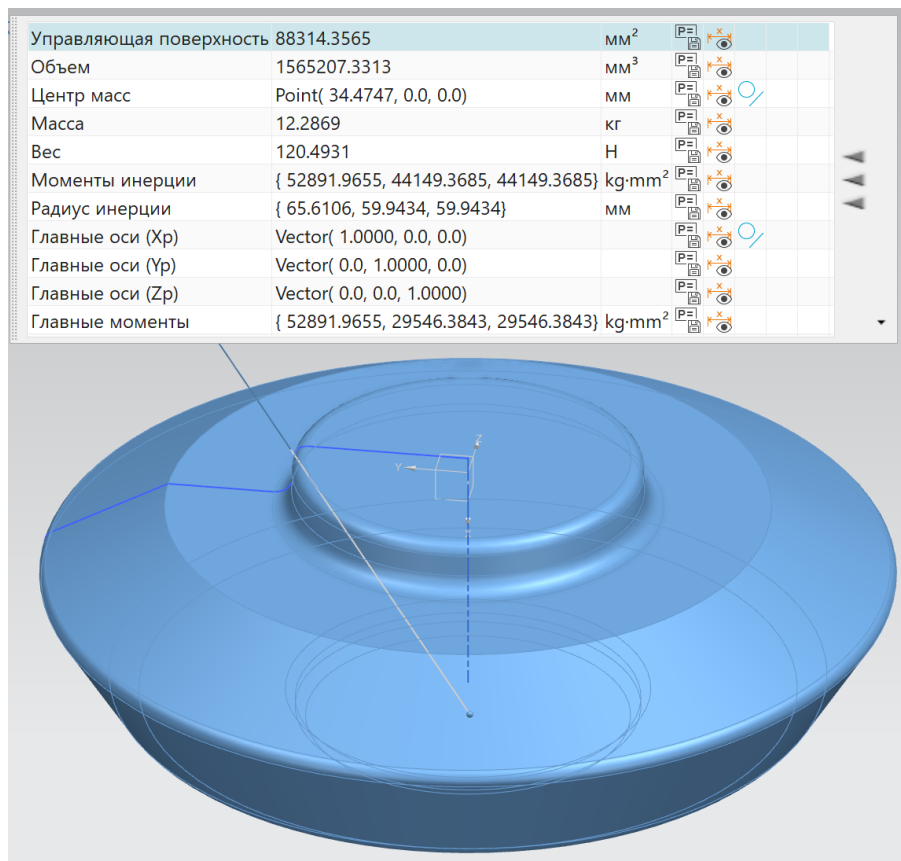


Рисунок 1.2 – Модель штампованої заготовки на ГKM

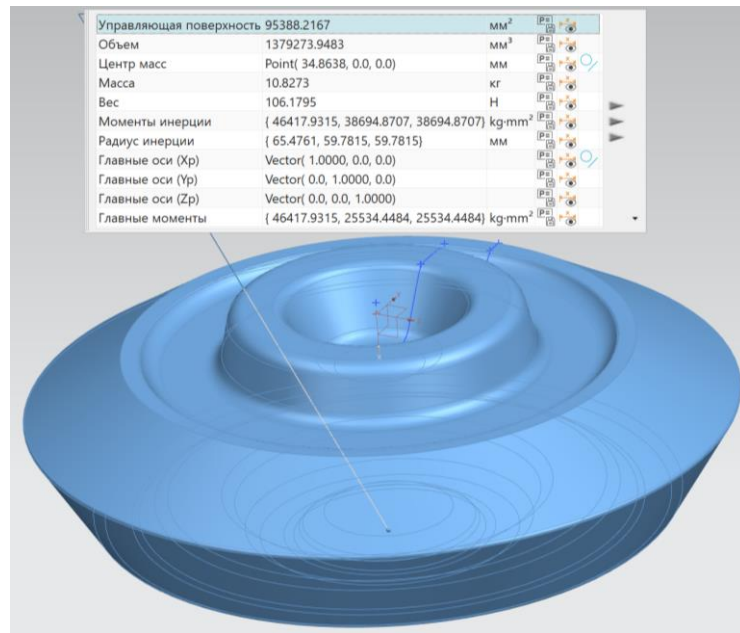


Рисунок 1.3 – Модель штампованной заготовки на КГШП

Для штамповки на ГКМ: $m = 12,29$ кг, $V = 1565207$ мм³

Для штамповки на КГШП: $m = 10,83$ кг, $V = 1379273$ мм³

Визначимо коефіцієнт використання матеріалу за формулою (1.2) [2]:

$$K_{\text{вм}} = \frac{m_{\text{дем}}}{m_{\text{заг}}} \quad (1.2)$$

$$KBM_{\text{ГКМ}} = \frac{5,9}{12,29} = 0,48$$

$$KBM_{\text{КГШП}} = \frac{5,9}{10,83} = 0,54$$

Визначимо собівартість виготовлення однієї заготовки за формулою (1.3) [2]:

$$B = \frac{B_6}{1000} \cdot m_{\text{заг}} \cdot Km \cdot Kc \cdot Kv \cdot Km \cdot Kn - (m_{\text{заг}} - m_{\text{дем}}) \cdot \frac{B_{\text{відх}}}{1000} \quad (1.3)$$

де B_6 – базова вартість 1 тони заготовки,

K_t – коефіцієнт, що залежить від класу точності;

K_c – коефіцієнт, що залежить від групи складності;

K_b – коефіцієнт, що залежить від ваги;

K_m – коефіцієнт, що залежить від матеріалу;

K_p – коефіцієнт, що залежить від обсягів виробництва заготовок;

$B_{отх}$ – вартість 1 тони стружки.

$$B_{ГКМ} = \frac{110000}{1000} \cdot 12,29 \cdot 0,9 \cdot 1,8 \cdot 1,11 \cdot 0,89 \cdot 1,0 - (12,29 - 5,9) \cdot \frac{5000}{1000} = 2163,58 \text{ грн}$$

$$B_{КГШП} = \frac{116000}{1000} \cdot 10,83 \cdot 0,9 \cdot 1,8 \cdot 1,11 \cdot 0,89 \cdot 1,0 - (10,83 - 5,9) \cdot \frac{5000}{1000} = 2033,14 \text{ грн}$$

В результаті розрахунків маємо [2]:

$$B_{КГШП} \leq B_{ГКМ}$$

$$K_{вмКГШП} \geq K_{вмГКМ}$$

Оскільки коефіцієнт використання матеріалу при отриманні заготовки на КГШП більше ніж на ГКМ і виходячи з вартості однієї заготовки, можемо зробити висновок, що краще прийняти метод одержання заготовки на КГШП, оскільки цей метод є економічним. Отримані дані заносимо до табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Результати розрахунку собівартості заготовок [3]

Показники	Позн.	Од. вим.	Варіанти	
			ГКМ	КГШП
Вага деталі	$m_{дет}$	кг	5,9	5,9
Вага заготовки	$m_{заг}$	кг	9,86	8,81
КВМ	$K_{вм}$		0,18	0,222
Базова ціна заготовки	$B_б$	грн	3500	3700
Коефіцієнти	K_T		0,9	0,9
	K_M		1,8	1,8
	K_C		0,89	0,89
	K_B		1,11	1,11
	K_P		1	1
Вартість за тону стружки	$B_{відх}$	грн	5000	5000
Вартість однієї заготовки	B	грн	2163,58	2033,14

Ескіз заготовки, яка виготовлена на КГШП показана на рисунку 1.4.

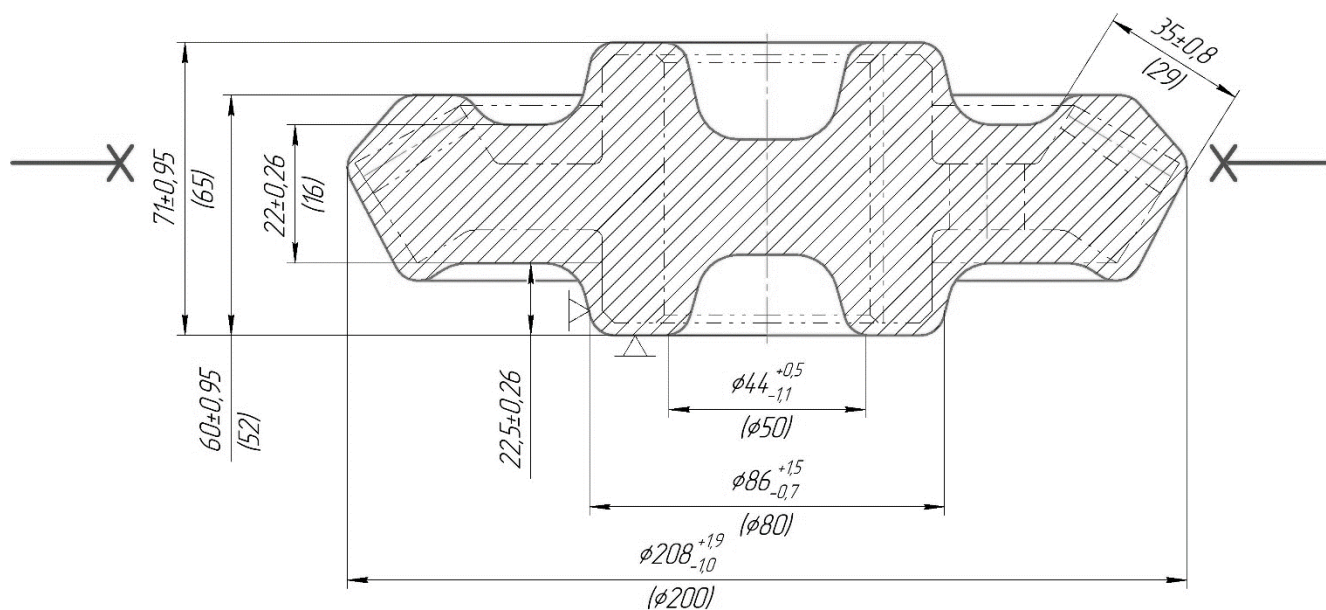


Рисунок 1.4 – Ескіз заготовки, яка отримана штамповкою на КГШП

Ескіз заготовки, яка отримана штамповкою на ГKM показано на рисунку 1.5.

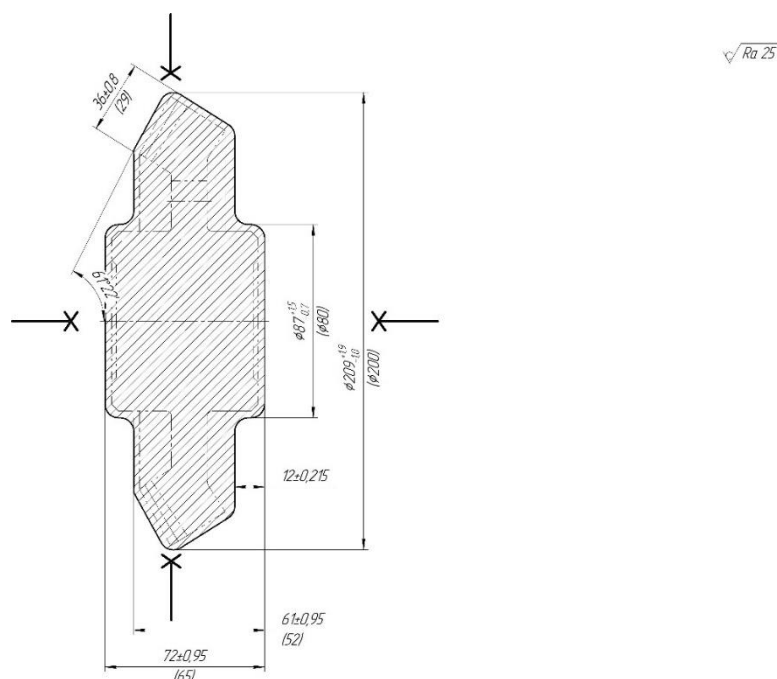


Рисунок 2.4 – Ескіз заготовки, яка отримана штамповкою на ГKM

Визначимо середньорічний економічний ефект за формулою (1.4):

$$E = (S_{ГKM} - S_{КГШП}) \cdot N \quad (1.4)$$

$$E = (2163,58 - 2033,14) \cdot 5000 = 652200 \text{ грн.}$$

Річну економію матеріалу визначимо за формулою (1.5):

$$M = \frac{q \times (\eta_1 - \eta_2)}{\eta_1 \times \eta_2} \times N \quad (1.5)$$

$$M = \frac{5,9 \times (0,54 - 0,48)}{0,54 \times 0,48} \times 5000 = 6828 \text{ кг}$$

Враховуючи задану програму випуску у 5000 деталей, вибір КГШП забезпечує максимальну економічну ефективність виробничого процесу, тому саме цей метод отримання заготовки затверджується як базовий для подальшого проектування маршрутно-операційної технології. Таким чином, $\eta_{ГKM} < \eta_{КГШП}$ и $S_{ГKM} > S_{КГШП}$, приведені витрати при штамповці на КГШП нижче, відповідно, цей вид заготовки економічно вигідніше, ефект від застосування цього методу буде 652200грн або в натуральному виразі 6828кг.

1.4 Проектування технологічного маршруту виготовлення деталі «Колесо зубчасте»

1.4.1 Вибір технологічних баз

Проектування маршрутно-операційної технології вимагає обґрунтованого призначення технологічних баз для забезпечення заданих робочим кресленням допусків розмірів, форми та взаємного розташування поверхонь. Основу базування становить принцип суміщення баз, згідно з яким за технологічну базу приймаються поверхні, що виконують функції конструкторської та виміральної баз. Відповідно до креслення зубчастого колеса, головною конструкторською

базою деталі є внутрішній посадковий отвір $\varnothing 50H7^{(+0,025)}$ (позначений як технологічна база «Б») та безпосередньо прилеглий до нього торець маточини. Ці поверхні визначають просторове положення зубчастого колеса у складальній одиниці механізму. Технічні вимоги креслення регламентують допуск торцевого биття опорного торця зубчастого вінця відносно осі центрального базового отвору в межах 0,05 мм. Забезпечення зазначеного параметра вимагає застосування схеми базування, яка усуває похибки встановлення на етапах механічної обробки.

На першій операції механічної обробки формується головна чистова база для наступного технологічного маршруту. Для реалізації цього завдання призначається чорнова база — поверхня вихідної заготовки, яка не піддавалася механічній обробці і використовується одноразово під час першого установа. Згідно з технологічними нормативами вибору чорнових баз, базування здійснюється за поверхні, відносно яких вимагається найменше зміщення оброблених контурів. Аналіз геометрії штампованої заготовки, отриманої на кривошипному гарячештампувальному пресі, вказує на використання зовнішньої циліндричної поверхні маточини діаметром $\varnothing 86$ мм як подвійної прямої бази. Опорною базою виступає необроблений торець маточини заготовки. Фіксація поковки за вказаною схемою у трикулачковому самоцентруючому патроні дозволяє за один установ виконати чорнове та напівчистове розточування отвору $\varnothing 44$ мм до розміру, що відповідає припускам під подальшу обробку до $\varnothing 50$ мм. У цьому ж установі здійснюється підрізання протилежного торця маточини та торця зубчастого вінця. Суміщення обробки отвору та торця в межах одного установа мінімізує просторову похибку та забезпечує їхню взаємну перпендикулярність, що є необхідною умовою для формування точної чистової бази.

Після обробки центрального отвору та торця маточини вони набувають статусу єдиної головної чистової технологічної бази, яка застосовується на всіх наступних операціях формоутворення лезовим інструментом. Це дозволяє реалізувати принцип постійності баз у технологічному процесі. На другій токарній операції деталь встановлюється обробленим отвором на розтискну (гідропластну чи цангову) оправку з осьовим підтисканням до обробленого торця.

Базування на оправці усуває радіальне биття отвору відносно осі обертання шпинделя верстата з числовим програмним керуванням. До переліку технологічних переходів даної операції входить обробка зовнішнього діаметра заготовки $\varnothing 208$ мм до чистового розміру $\varnothing 200h9$ мм. Також виконується формування конічних поверхонь зубчастого вінця із кутами $116,85^\circ$ та $59^\circ 22'$, обточування зовнішньої поверхні маточини до $\varnothing 80$ мм та обробка технологічних фасок $2 \times 45^\circ$ і $3 \times 45^\circ$. Використання центрального отвору як єдиної чистової бази гарантує дотримання допуску торцевого биття $0,05$ мм між зубчастим вінцем та базою «Б».

Для виконання подальших формоутворювальних операцій зберігається встановлена чистова база. На операції протягування шпонкового паза розміром $14H9 (+0,043)$ мм на $53,3^{+0,2}$ мм деталь базується на циліндричному пальці пристрою горизонтально-протяжного верстата по отвору $\varnothing 50H7$. Опорний фланець пристрою контактує з обробленим торцем маточини, що забезпечує симетричне розташування шпонкового паза відносно центральної осі деталі. На етапі зубофрезерування та під час виконання свердлильної операції для утворення п'яти отворів $\varnothing 18$ мм базування також здійснюється по центральному отвору на прецизійній оправці. Дотримання принципу постійності баз на зубонарізній операції мінімізує кінематичну похибку евольвентного профілю зубчастого вінця. Запропонована схема призначення баз відповідає структурним особливостям поковки та забезпечує досягнення регламентованої точності деталі згідно з державними стандартами.

1.4.2 Проектування маршруту обробки поверхонь

У даному розділі виконується аналітичний розрахунок маршрутів обробки для найбільш відповідальних поверхонь деталі, до яких висуваються найжорсткіші вимоги щодо точності посадок та трибологічних характеристик.

Результатом проектування є структуровані дані, які містять розгорнуту послідовність переходів із зазначенням проміжних припусків, допусків та очікуваних параметрів шорсткості на кожному етапі зняття шару матеріалу. Такий підхід забезпечує технологічну спадковість параметрів якості та гарантує усунення дефектних шарів на фінішних стадіях виготовлення виробу.

Аналітично розрахуємо МОП на зовнішню та внутрішню діаметральні поверхні. Для внутрішньої циліндричної поверхні Ø50H7 шорсткість заготовки $R_a = 12,5$ мкм, допуск $Td_3 = 0,25$ мм, шорсткість деталі $R_a = 0,8$ мкм, допуск $Td = 0,025$ мм.

Визначаємо уточнення за параметрами точності ε_d та шорсткості R_{a_d} за формулами (1.6), (1.7) [4]:

$$\varepsilon_d = \frac{Td_3}{Td_0} \quad (1.6)$$

де Td_3 , Td_d – допуски на заготовку та деталь відповідно.

$$\varepsilon_d = \frac{0,25}{0,025} = 10$$

$$\varepsilon_{Rz} = \frac{Ra_3}{Ra_0} \quad (1.7)$$

де Ra_3 , Ra_d – шорсткість на заготовку та деталь відповідно.

$$\varepsilon_{Rz} = \frac{12,5}{0,8} = 15,525$$

Кількість переходів визначаємо за показником шорсткості. За цим показником розраховуємо k переходів визначаємо за формулою (1.8) [4]:

$$k = 2 \cdot \lg \varepsilon_{Ra} \quad (1.8)$$

$$k = 2 \cdot \lg 15,525 = 2,38$$

Приймаємо $k = 3$

Різниця класів шорсткості та їх розподіл $KЛ = KЛ7 - KЛ3 = 4 = 2 + 1 + 1$

Встановлюємо послідовність показників точності: $KЛ3 - KЛ5 - K6 - KЛ7$

Призначаємо методи обробки за переходами. Заготівельна (свердлильна) –
зенкерування – розгортання – шліфування.

За [4] призначаємо допуски та шорсткість за переходами, див. табл. 1.4.

Визначаємо уточнення за показниками точності та шорсткості для
зенкерування за формулами (1.6), (1.7) [4]:

$$\varepsilon_{d2} = \frac{0,25}{0,062} = 4,03$$

$$\varepsilon_{Rz} = \frac{12,5}{6,3} = 1,98$$

Для інших переходів уточнення розраховується так само. Результати
розрахунків заносимо в таблицю 1.4.

Для зовнішньої циліндричної поверхні $\varnothing 200h9$ шорсткість заготовки $R_a = 25$ мкм, [4], допуск $Td_3 = 2,9$ мм, шорсткість деталі $R_a = 6,3$ мкм, допуск $Td = 0,115$ мм.

Визначаємо уточнення за показниками точності та шорсткості за
формулами (1.6), (1.7) [4]:

$$\varepsilon_d = \frac{2,9}{0,115} = 25,22$$

$$\varepsilon_{Ra} = \frac{25}{6,3} = 3,97$$

Кількість переходів визначаємо за показником точності геометричного
розміру. За цим показником розраховуємо k переходів за формулою (1.8) [4]:

$$k = 2 \cdot \lg 25,22 = 2,8$$

Приймаємо $k = 3$

Різниця квалітетів точності та їх розподіл $IT=IT16-IT9=7=3+2+2$

Встановлюємо послідовність показників точності: IT16-IT13-IT11-IT9.

Призначаємо методи обробки за переходами. Заготівельна – токарна чорнова – токарна напів. чистова – токарна чистова.

За [4] призначаємо допуски та шорсткість за переходами та заносимо в таблицю 1.4. Визначаємо уточнення за показниками точності та шорсткості для точіння чорнового за формулами (1.6), (1.7) [4]:

$$\varepsilon_{d2} = \frac{2,9}{0,72} = 4,03$$

$$\varepsilon_{Rz} = \frac{25}{12,5} = 2$$

Для інших переходів уточнення розраховується так само.

Результати розрахунків заносимо в таблицю 1.4.

1.4.3 Проектування технологічного маршруту виготовлення деталі

Технологічний маршрут виготовлення зубчастого колеса зі сталі 40Х формується з урахуванням специфіки конструкції деталі, вимог до точності взаємного розташування поверхонь та необхідності забезпечення високої контактної витривалості зубчастого вінця. Процес розпочинається з етапу попередньої термічної обробки — поліпшення поковки, отриманої на кривошипному гарячештампувальному пресі. Ця операція необхідна для зняття внутрішніх кувальних напружень, подрібнення зерна та досягнення твердості, оптимальної для якісного різання та формування сегментної стружки на наступних етапах.

Після завершення токарної обробки маршрут передбачає виконання операцій з утворення спеціальних конструктивних елементів. На горизонтально-протяжному верстаті здійснюється протягування шпонкового паза у центральному отворі. Далі деталь передається на зубофрезерну операцію, де за допомогою черв'ячної модульної фрези методом обкатування виконується попереднє нарізання евольвентного профілю зубів. Наступним кроком є свердлильна операція для утворення п'яти розвантажувальних отворів у диску зубчастого колеса.

Для досягнення заданих експлуатаційних характеристик — високої поверхневої твердості та зносостійкості профілю зуба при збереженні в'язкої серцевини — деталь піддається остаточній термічній обробці: поверхневому загартуванню струмами високої частоти (СВЧ) з наступним низьким відпуском.

Завершальним етапом технологічного маршруту є група фінішних операцій. Оскільки термічна обробка неминує викликає мікродеформації (короблення) металу, для відновлення точності базового отвору може призначатися операція внутрішнього шліфування. Головною ж фінішною операцією є зубошліфування активних поверхонь зубів, яке усуває похибки

кроку та профілю, що виникли під час термообробки, та забезпечує задану кресленням шорсткість (R_a 0,8 мкм). Маршрут закінчується операцією технічного контролю для комплексної перевірки геометричних і кінематичних параметрів готового зубчастого колеса.

1.5 Розрахунок припусків і технологічних розмірів

Розрахунок технологічних розмірів на поверхню Ø50H7 виконується методом розмірних ланцюгів [5]. Мінімальний припуск визначаємо за формулою (1.9):

$$2Z_{imin} = 2 \cdot \left(Rz_{i-1} + h_{i-1} + \sqrt{\rho_{i-1}^2 + \varepsilon_i^2} \right) \quad (1.9)$$

де, Rz_{i-1} – шорсткість за i -тим переходом;

h_{i-1} – глибина дефектного шару за i -тим переходом;

ρ_{i-1} – сумарне значення просторових відхилень за i -тим переходом;

ε_i – похибка встановлення заготовки за i -тим переходом;

Для заготовки (свердління) шорсткість та глибину дефектного шару приймаємо $Rz=50\text{мкм}$ и $h=100\text{мкм}$ відносно до ваги заготовки заготовки [5].

Для штамповки нормальної точності (серійне виробництво): $\rho_{cm}=525\text{мкм}$, $\rho_{кор} = \Delta_k \times l = 5,3 \times 65 = 344,5\text{мкм} = 0,344\text{мм}$ [5].

Сумарне значення просторових відхилень визначаємо за формулою (1.10) [5]:

$$\rho_1 = \sqrt{\rho_{cm}^2 + \rho_{кор}^2} \quad (1.10)$$

$$\rho_1 = \sqrt{525^2 + 344^2} = 627,66\text{мкм} = 0,628\text{мм} \quad (1.10)$$

Отримані значення заносимо в таблицю 1.5.

Зенкерування Rz, h: $Rz_2=25\text{мкм}$, $h_2=50\text{мкм}$, $\rho_2=k_y \times \rho_1=0,06 \times 628=37,68\text{мкм}=0,037\text{мм}$, $k=0,06$ – коефіцієнт уточнення [5].

Похибки установки заготовки визначаємо за формулою (1.11) [3]:

$$\varepsilon_2 = 0,25 \cdot \sqrt{Td_{\text{заг}}^2 + 1} = 0,25\sqrt{0,25^2 + 1} = 0,258\text{мм} = 258\text{мкм} \quad (1.11)$$

де $Td_{\text{заг}}=0,25\text{мм}$ – допуск бази заготовки.

Розгортання Rz, h, приймаємо [5]: $Rz_3=12,5\text{мкм}$, $h_3=25\text{мкм}$, $\rho_3=1,88\text{мкм}$, $\varepsilon_3=15,48\text{мкм}$.

Шліфування Rz, h, приймаємо [5]: $Rz_4=3,2\text{мкм}$, $h_4=12,5\text{мкм}$, $\rho_4=0,0\text{мкм}$, $\varepsilon_4=0,77\text{мкм}$.

Мінімальний припуск на зенкерування за формулою (1.9):

$$2Z_{1\min} = 2 \cdot [50 + 100 + \sqrt{(628^2 + 258^2 + 97,5^2)}] = 1671\text{мкм} = 1,671\text{мм}$$

Мінімальний припуск на розгортання за формулою (1.9):

$$2Z_{2\min} = 2 \cdot [25 + 50 + \sqrt{(37,68^2 + 15,48^2)}] = 231,5\text{мкм} = 0,232\text{мм}$$

Мінімальний припуск на шліфування за формулою (1.9):

$$2Z_{3\min} = 2 \cdot [12,5 + 25 + \sqrt{(1,88^2 + 0,77^2)}] = 79,06\text{мкм} = 0,08\text{мм}$$

Визначаємо мінімальний розмір поверхні деталі – розмір останнього переходу механічної обробки за формулою (1.10) [6]:

$$d_4^{\min} = d_4^{\text{НОМ}} + \text{eid}_4 \quad (1.10)$$

$$d_4^{\min} = 50 + 0 = 50\text{мм}$$

Далі розрахункові мінімальні розміри знаходимо за формулою (1.11) [6]:

$$d_i^{\min} = d_{i+1}^{\min} - z_{i+1}^{\min} - Td_i \quad (1.11)$$

$$\begin{aligned} d_3^{\min} &= 50 - 0,08 - 0,039 = 49,881\text{мм}; \\ d_2^{\min} &= 49,881 - 0,232 - 0,062 = 49,587\text{мм}; \\ d_1^{\min} &= 49,587 - 1,671 - 0,25 = 47,66\text{мм}; \end{aligned}$$

Розраховуємо максимальні розміри поверхонь для переходів за формулою (1.12) [6]:

$$\begin{aligned} d_i^{\max} &= d_i^{\min} + Td_i \quad (1.12) \\ d_1^{\max} &= 47,66 + 0,25 = 47,91\text{мм}; \\ d_2^{\max} &= 49,587 + 0,062 = 49,649\text{мм}; \\ d_3^{\max} &= 49,881 + 0,039 = 49,92\text{мм}; \\ d_4^{\max} &= 50 + 0,025 = 50,025\text{мм}; \end{aligned}$$

Розраховуємо максимальні припуски для переходів механічної обробки за формулою (1.13) [6]:

$$\begin{aligned} 2Z_{i\max} &= d_i^{\max} - d_{i+1}^{\min} \quad (1.13) \\ 2Z_{\min1} &= 49,649 - 47,68 = 1,969\text{мм}; \\ 2Z_{\min3} &= 49,91 - 49,587 = 0,333\text{мм}; \\ 2Z_{\min3} &= 50,025 - 49,881 = 0,144\text{мм}; \end{aligned}$$

Перевіряємо розрахунки за формулою (1.14) [6]:

$$2Z_0^{\max} - 2Z_0^{\min} = Td_{\text{заг}} + Td_{\text{дет}} \quad (1.14)$$

$$2,345 - 2,07 = 0,25 + 0,025$$

Виконавчий розмір заготовки буде дорівнювати: $\varnothing 47,68^{+0,25}$
 виконавчі розміри по іншим переходам виконуємо в системі «отвору», тому
 за номінальний розмір приймаємо мінімальне значення розміру поверхні
 плюс допуск на обробку, як верхнє відхилення, всі данні заносимо у таблицю
 1.5

Таблиця 1.5 – Розрахунок припусків [6]

№ Пов.	Перехід	Елементи припуску, мкм				Розрахунковий		Допуск, мм	Макс. розмір, мм	Мінім. розмір, мм	Припуск на обробку, мкм		Виконавчий розмір, мм
		Rz	h	ρ	ε	припуск, мкм	Розмір, мм				2Z _{max}	2Z _{min}	
Ø50H7	Заготовка	50	100	628	-	-	47,68	5,0	47,93	47,68	-	-	Ø47,7 ^{+0,25}
	Т/О	-	-	97,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Зенкерув.	25	50	37,7	258	1671	49,88	1,52	49,65	49,88	1969	1671	Ø49,6 ^{+0,062}
	Розгорт.	12,5	25	1,88	15,48	232	49,88	0,73	49,92	49,88	333	232	Ø49,9 ^{+0,039}
	Шліф.	3,2	12,5	0	0,77	80	50	0,2	50,025	50	144	80	Ø50 ^{+0,025}

1.6 Розрахунок режимів різання

Призначення раціональних режимів різання є одним із ключових етапів розробки технологічного процесу, оскільки від їхніх значень безпосередньо залежить продуктивність механічної обробки, стійкість різального інструменту, якість поверхневого шару деталі та загальна економічна ефективність виробництва. Основне завдання розрахунку полягає у визначенні таких параметрів (глибина різання, подача, швидкість різання та частота обертання шпинделя), які забезпечать максимальну інтенсивність зняття припуску при збереженні заданих параметрів точності та шорсткості.

Деталь - зубчасте колесо, матеріал = Сталь 40Х; $\sigma_B = 620$ МПа, HB = 190

Операційний ескіз токарної операції з ЧПУ показано на рис. 1.6.

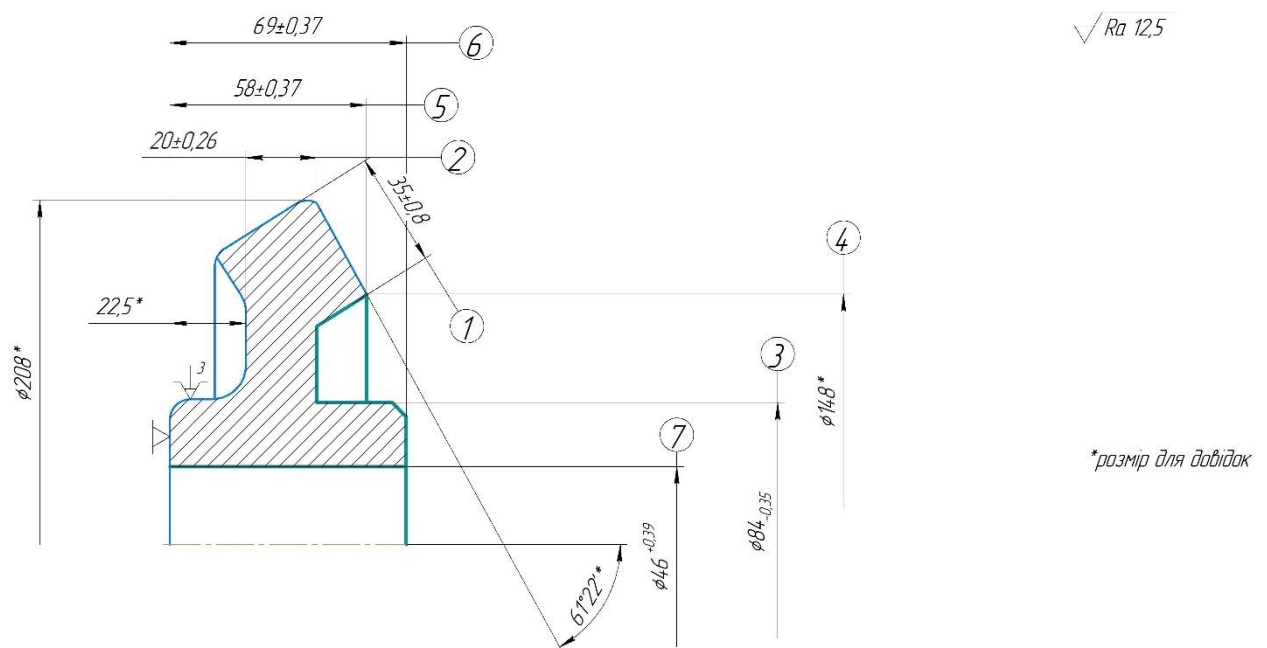


Рисунок 1.6 – Операційний ескіз токарної операції

Чорнове точіння.

Глибина різання $t=1,0$ мм.

Подача: $S_{\text{табл}} = 0,29 \text{ мм/об}$ [7] - (Для радіусу при вершині 0,8 мм, і шорсткості $R_a = 6,3$).

Розраховуємо подачу, враховуючи коефіцієнт поправки за формулою (1.15):

$$S_o = S_{om} \cdot K_{So} \quad (1.15)$$

де K_{So} - поправочний коефіцієнт на подачу для умов обробки, що змінюються, всі поправочні коефіцієнти знаходяться в [7] розраховується за формулою (1.16):

$$K_{So} = K_{Sn} \cdot K_{Su} \cdot K_{S\phi} \cdot K_{S3} \cdot K_{Sж} \cdot K_{Sm} \quad (1.16)$$

де K_{sn} - Коефіцієнт, що враховує стан оброблюваної поверхні, $K_{sn} = 1$;

K_{su} - Коефіцієнт, що враховує матеріал інструменту, $K_{su} = 1$;

$K_{s\phi}$ - коефіцієнт, що враховує форму оброблюваної поверхні, $K_{s\phi} = 0,7$;

K_{s3} - Коефіцієнт, що враховує вплив гарту, $K_{s3} = 0,8$;

$K_{sж}$ - Коефіцієнт, що враховує жорсткість технологічної системи, $K_{sж} = 0,62$;

K_{sm} - Коефіцієнт, що враховує матеріал оброблюваної деталі $K_{sm} = 1,07$.

$$K_{So} = 1 \cdot 1 \cdot 0,7 \cdot 0,8 \cdot 0,62 \cdot 1,07 = 0,37$$

$$S_o = 0,29 \cdot 0,37 = 0,107 \text{ мм/об}$$

Коригуємо подачу за паспортом верстата $S_o = 0,10 \text{ мм/об}$. Стійкість різців по [7] приймаємо $T = 90 \text{ хв}$.

Розраховуємо швидкість різання за формулою (1.17) [7]:

$$V = V_m \cdot K_v \quad (1.17)$$

де V_m – табличне значення швидкості різання за нормативами [7] приймаємо

$$V_m = 304 \text{ м/хв.}$$

K_v – поправочний коефіцієнт на швидкість різання розраховується за такою формулою (1.18) [7]:

$$K_v = K_{VM} \cdot K_{VI} \cdot K_{V\phi} \cdot K_{Vm} \cdot K_{Vж} \cdot K_{Vn} \cdot K_{Vo} \quad (1.18)$$

де K_{VM} - Коефіцієнт, оброблюваності матеріалу, $K_{VM} = 0,8$ [7];

K_{VI} - Коефіцієнт, що враховує властивості матеріалу інструменту, $K_{VI}=1$, [7];

$K_{V\phi}$ - коефіцієнт, що враховує вплив кута в плані, $K_{V\phi} = 1$ ($\phi = 60^\circ$), [7];

K_{Vm} - Коефіцієнт, що враховує вид обробки, $K_{Vm} = 0,6$ (для розточування отвору діаметром до 80), [7];

$K_{Vж}$ - коефіцієнт, що враховує жорсткість технологічної системи, $K_{Vж} = 0,6$ [7];

K_{Vn} - Коефіцієнт, що враховує стан оброблюваної поверхні, $K_{Vn} = 1$, [7];

$K_{Vпро}$ - Коефіцієнт, що враховує вплив ЗОТС, $K_{Vпро} = 1$ [7].

$$K_v = 0,8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,6 \cdot 0,6 \cdot 1 \cdot 1 = 0,288$$

$$V = 304 \cdot 0,288 = 87,55 \text{ м/хв}$$

Розраховуємо швидкість обертання шпинделя n (об/хв) за формулою (1.19) [7]:

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D} \quad (1.19)$$

де D – діаметр оброблюваної заготовки, мм.

$$n = \frac{1000 \cdot 87,55}{3,14 \cdot 45} = 619,6 \text{ об/хв}$$

Коригуємо обертання шпинделя за паспортом верстата $n_\delta = 600$ об/хв.

Знаходимо дійсну швидкість різання за формулою (1.20) [7]:

$$V_\delta = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (1.20)$$

$$V_\delta = \frac{3,14 \cdot 45 \cdot 600}{1000} = 84,78 \text{ м/хв}$$

Силу різання визначимо за формулою (1.21) [7]:

$$P_z = 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot s^y \cdot V^n \cdot k_p, \quad (1.21)$$

де, C_p – коефіцієнт, який залежить від умов обробки, $C_p=204$ [7];

x, y, n – показники степені, які залежать від умов обробки $n=0$; $x=1,0$; $y=0,75$; [8,9];

k_p – коригувальний коефіцієнт, який залежить від фактичних умов різання визначаємо за формулою (1.22) [8,9]:

$$K_p = k_{mv} \cdot k_{\phi v} \cdot k_{\gamma v} \cdot k_{\lambda v} \cdot k_{rv}, \quad (1.22)$$

де, k_{mv} – коригувальний коефіцієнт, який залежить від якості оброблюємого матеріалу отримуємо за формулою (1.23) [8,9]:

$$k_{MP} = \left(\frac{\sigma_B}{750} \right)^n \quad (1.23)$$

$$k_{MP} = \left(\frac{1080}{750} \right)^{0,75} = 1,31$$

$k_{\phi p}, k_{\gamma p}, k_{\lambda p}, k_{rp}$ – поправочні коефіцієнти, що враховують вплив геометричних параметрів ріжучої частини інструменту $k_{\phi p}=1,08$, $k_{\gamma p}=1,15$, $k_{\lambda p}=1,0$, $k_{rp}=0,93$, [7];

$$k_p = 1,31 \times 1,08 \times 1,15 \times 1,0 \times 0,93 = 1,51$$

$$P_z = 10 \times 204 \times 1,0^{1,0} \times 0,1^{0,75} \times 84,78^0 \times 1,51 = 547,78 \text{ Н}$$

Визначаємо потужність різання за формулою (1.24) [7]:

$$N = \frac{P_z \cdot V}{1020 \cdot 60}, \quad (1.24)$$

де, P_z – сила різання, Н

V – швидкість різання, м/хв

$$N = \frac{547,78 \times 83,52}{1020 \times 60} = 0,77 \text{ кВт}$$

Визначаємо машинний час за формулою (1.25) [7]:

$$T_0 = \frac{l + y + \Delta}{n \cdot S_0}; \quad (1.25)$$

де, l - довжина оброблюємої поверхні, $l=147,59$ мм;

y - величина врізання, мм $y=3$ мм;

Δ - величина перебігу інструменту, $\Delta=3$ мм.

$$T_0 = \frac{147,59 + 3 + 3}{600 \times 0,1} = 2,56 \text{ хв}$$

Розрахуємо режими різання на свердлильну операцію з ЧПК.

Деталь – колесо зубчасте, матеріал – Сталь 40Х

Інструмент – свердло спіральне $D = 18$ мм із Р6М5

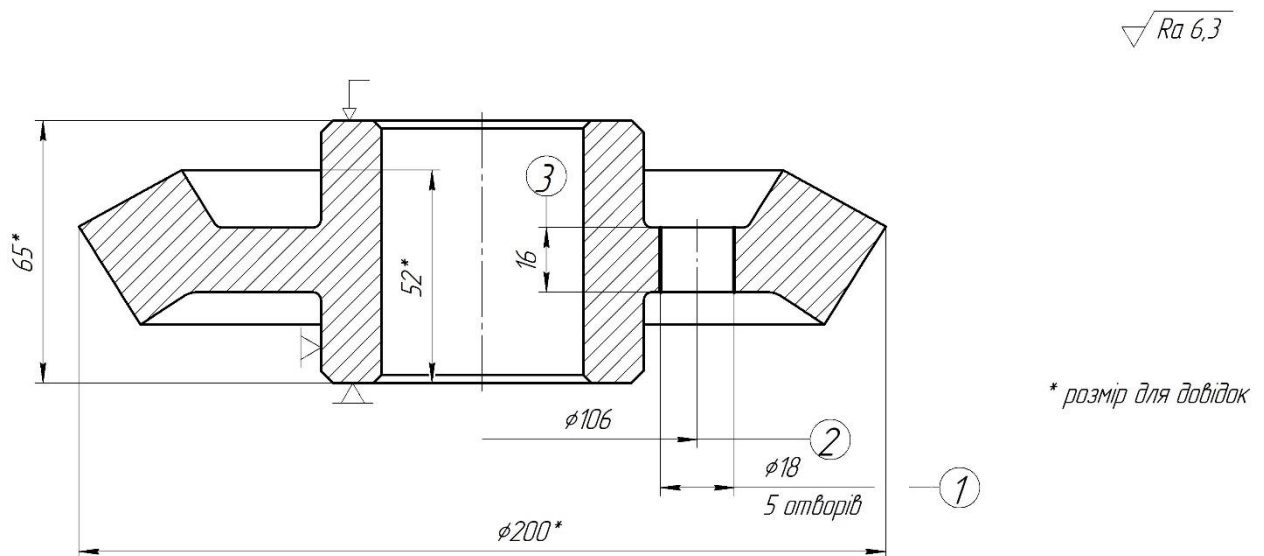


Рисунок 1.7 – Операційний ескіз свердлувальної операції

Свердлити згідно з ескізом п'ять отворів (рис. 1.7):

Довжина робочого ходу визначаємо за формулою (1.26) [7]:

$$Lp = 2 \cdot (l + y) \times i = 2 \cdot (16 + 9.6) \times 5 = 256 \text{ мм} \quad (1.26)$$

де l -довжина свердління $l = 16\text{мм}$;

$y=0,6d_{\text{св}}$ -врізання, мм;

де $d_{\text{св}}$ -діаметр свердла, мм;

Глибина різання визначається за формулою (1.27) [7]:

$$t = \frac{d_{\text{св}}}{2}; \quad (1.27)$$

$$t = \frac{18}{2} = 9\text{мм};$$

Визначаємо подачу за формулою (1.28) [7]:

$$S = S_{\text{маб}} \cdot K_S \quad (1.28)$$

де $S_{\text{от}}$ – значення подачі за нормативними даними $S_{\text{от}}=0,1\text{мм/об}$ [7];

K_S – узагальнений коригуючий коефіцієнт визначаємо за формулою (1.29) [7]:

$$K_S = K_{S_l} \cdot K_{S_{\text{ж}}} \cdot K_{S_{\text{II}}} \cdot K_{S_d} \cdot K_{S_M}; \quad (1.29)$$

де K_{S_l} - коефіцієнт, що враховує глибину свердління $K_{S_l} = 1,0$ [7];

$K_{S_{\text{ж}}}$ - коефіцієнт, який залежить від жорсткості системи СПД $K_{S_{\text{ж}}} = 1,0$ [7];

$K_{S_{\text{II}}}$ - коефіцієнт, який залежить від матеріалу інструменту $K_{S_{\text{II}}} = 1,0$ [7];

K_{S_d} – коефіцієнт, який залежить від типу отвору, що обробляється $K_{S_d} = 1,0$ [7];

K_{S_M} - коефіцієнт, який залежить від марки оброблюваного матеріалу $K_{S_M} = 0,75$ [7];

$$K_S = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,75 = 0,75;$$

$$S = 0,1 \cdot 0,75 = 0,075\text{мм/об};$$

Коригуємо подачу за паспортом верстата $S=0,07\text{мм/об}$

Розраховуємо швидкість різання за формулою (1.30) [7]:

$$V = \frac{C_v \cdot d_{ce}^q}{T^m \cdot S^y} \cdot K_v \quad (1.30)$$

де C_v, q, y, m - коефіцієнт та показники ступеня [7];

T – стійкість свердла, хв; [7];

S – подача мм;

K_{ov} – поправочний коефіцієнт, що враховує умови різання визначаємо за формулою (1.31) [7]:

$$K_v = K_{MV} \cdot K_{IV} \cdot K_{IV} \quad (1.31)$$

де K_{MV} - коефіцієнт, що враховує вплив фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу на швидкість різання визначаємо за формулою (1.32) [7]:

$$K_{MV} = K_r \left(\frac{750}{\sigma_s} \right)^{n_v} \quad (1.32)$$

$$K_{MV} = 0.8 \cdot \left(\frac{750}{800} \right)^{1.0} = 0.72$$

K_{IV} - Коефіцієнт, що враховує вплив інструментального матеріалу, $K_{IV} = 0,3$ [7];

K_{IV} - Коефіцієнт, що враховує глибину свердління $K_{IV} = 1,0$ [7];

$C_v = 7,0$; $q=0.40$; $y=0.7$; $m=0.20$; $T=25$ хв [2, т. 38, стор 383].

$$K_v = 0,72 \cdot 0,3 \cdot 1,0 = 0,21$$

$$V = \frac{7 \cdot 9^{0,40}}{25^{0,20} \cdot 0,07^{0,7}} \cdot 0,21 = 12.42 \text{ м/хв}$$

Розраховуємо кількість оборотів свердла за формулою (1.33) [7]:

$$n_p = \frac{1000 \cdot V_p}{\pi \cdot d_{ce}} \quad (1.33)$$

$$n_p \frac{1000 \cdot 12.42}{3.14 \cdot 9} = 439 \text{об/хв}$$

Коригуємо по верстату: $n=440$ об/хв.

Визначаємо фактичну швидкість обертання свердла за формулою (1.20) [7]:

$$V_\phi = \frac{3.14 \cdot 9 \cdot 440}{1000} = 12.43 \text{м/хв}$$

Крутячий момент, визначається за формулою (1.34) [7]:

$$M_{KP} = 10 \cdot C_M \cdot D^q \cdot S^y \cdot K_P \quad (1.34)$$

$$C_M = 0,041; \quad q = 2; \quad y = 0,7 \quad K_P = 1,04 \quad [7];$$

$$M_{KP} = 10 \times 0,041 \times 6,5^2 \times 0,1^{0,7} \times 1,04 = 3,42 \text{Н} \cdot \text{м}$$

Осьова сила, Н визначається за формулою (1.35) [7]:

$$P_O = 10 \times C_p \times D^q \times S^y \times K_p \quad (1.35)$$

$$C_p = 143; \quad q=1; \quad y=0,7; \quad K_p=1,04 \quad [3, \text{таблиця.32, стор.281}]$$

$$P_O = 10 \times 87 \times 3^1 \times 0,1^{0,7} \times 1,04 = 1173,4 \text{Н}$$

Розрахунок основного часу

Основний (технологічний) час визначається за формулою (1.36) [7]:

$$t_{O2} = \frac{l+l_1}{n \times S} \times i \quad (1.36)$$

де l – довжина оброблюваної поверхні (довжина отвору), $l=4$ мм;

l_1 – довжина врізання і перебігу інструменту $l_1 = 3,5$ мм, [7];

i – кількість проходів, $i = 1$;

n – частота обертання шпинделя з інструментом, об/хв;

S – подання інструменту, мм/об;

$$t_{02} = \left(\frac{256}{440 \times 0,1} \right) = 5,81 \text{ хв}$$

Розрахунок режимів різання на фрезерну операцію з ЧПУ

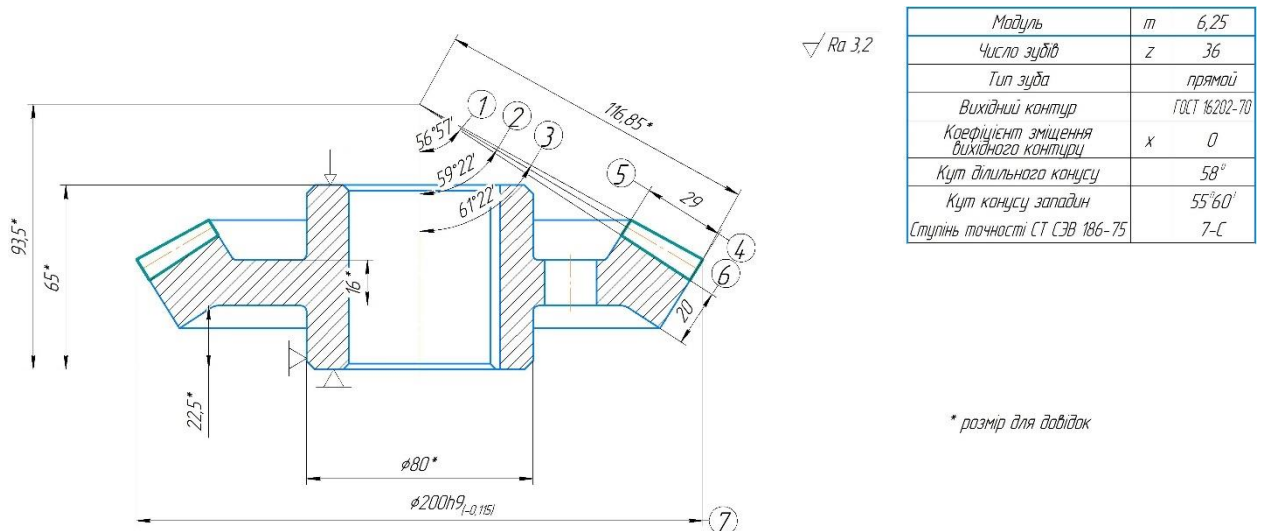


Рисунок 1.8 – Операційний ескіз на фрезерну операцію

Ріжучий інструмент:

Фреза дискова модульна $m=6,25$ №7 Р6М5 кл. В ГОСТ 10996-64

Визначимо подачу за формулою (1.37) [7]:

$$S_z = S_{zT} \cdot K_{SZ} \quad (1.37)$$

де $S_z=0,07$ мм/зуб – табличне значення подачі [8].

K_{so} – коефіцієнт, що враховує ряд конструктивних особливостей технологічної системи визначимо за формулою (1.38):

$$K_{SZ} = K_{SZH} \cdot K_{SZ\Phi} \cdot K_{SZR} \quad (1.38)$$

де K_{SZH} – коефіцієнт, що враховує матеріал інструменту, $K_{SZH} = 1$ [8];

$K_{Sz\phi}$ – коефіцієнт, що враховує вид оброблюваної поверхні, $K_{Sz\phi} = 1$ [8];

K_{SzR} – коефіцієнт, що враховує клас чистоти, $K_{SzR} = 0,5$ [8];

$$S_Z = 0,07 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,5 = 0,035 \text{ мм/зуб}$$

Розраховуємо швидкість різання за формулою (1.39):

$$V = V_m \cdot K_v \quad (1.39)$$

де V_m – табличне значення швидкості різання, $V_m = 24$ м/хв [8]

K_v – коефіцієнт, що враховує ряд відповідних умов обробки за формулою (1.40) [8]:

$$K_v = K_{V_M} \cdot K_{V_H} \cdot K_{V_O} \cdot K_{V_{II}} \cdot K_{V_{\phi}} \cdot K_{V_B} \quad (1.40)$$

де K_{V_M} – коефіцієнт, що враховує оброблюваність матеріалу, $K_{V_M} = 0,81$ [8];

K_{V_H} – коефіцієнт, що враховує стан поверхні, $K_{V_H} = 1$ [8];

K_{V_O} – коефіцієнт, що враховує умови обробки, $K_{V_O} = 1$ [8];

$K_{V_{\phi}}$ – коефіцієнт, що враховує вид обробки, $K_{V_{\phi}} = 1$ [8];

$K_{V_{II}}$ – коефіцієнт, що оцінює матеріал інструменту, $K_{V_{II}} = 1$ [8];

K_{V_B} – коефіцієнт, що враховує ширину фрезерування, $K_{V_B} = 1$ [8]

$$V = 24 \cdot 0,81 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 19,44 \text{ м/хв.}$$

Частоту обертів визначаємо за формулою (1.19):

$$n = \frac{1000 \cdot 19,44}{3,14 \cdot 7,7} = 804,03 \text{ об/хв}$$

Коригуємо значення обертів шпинделя за паспортом верстату $n = 800$ об/хв.

Знаходимо дійсну швидкість різання за формулою (1.20) [8]:

$$V = \frac{3,14 \cdot 7,7 \cdot 800}{1000} = 19,34 \text{ м/хв}$$

Хвилинну подачу визначаємо за формулою (1.41) [8]:

$$S_{\text{хв}} = S_Z \cdot z \cdot n_{\text{Д, мм/хв}} \quad (1.41)$$

$$S_{\text{хв}} = 0,035 \cdot 4 \cdot 800 = 112 \text{ мм/хв}$$

Відповідно довідника [8] в залежності від модуля і подачі, потужність різання $N_n = 0,8 \text{ кВт}$, дійсну потужність визначимо за формулою (1.42) [8]:

$$N_{\text{рез}} = N_n \cdot K_m \cdot K_k \cdot K_w \cdot K_\beta \quad (1.42)$$

де $K_m = 1$ – початковий коефіцієнт, який залежить від оброблюваного матеріалу [8];

$K_w = 1,64$ – початковий коефіцієнт, який залежить від кількості осевих переміщень [8];

$K_k = 1,1$ – початковий коефіцієнт, який залежить від кількості заходів фрези [8];

$K_\beta = 1$ – початковий коефіцієнт, який залежить від куту нахилу зубів колеса [8];

$$N_{\text{рез}} = 0,8 \cdot 1 \cdot 1,64 \cdot 1,1 \cdot 1 = 1,44 \text{ кВт}$$

Машинний час визначаємо за формулою (1.43) [8]:

$$T_o = \frac{l + y + \Delta}{n \cdot S_o \cdot Z} \times i \quad (1.43)$$

де l – довжина оброблюваної поверхні, $l = 12 \text{ мм}$ [8];

y – величина врізання, $y = 3 \text{ мм}$ [8];

Δ – величина перебігу інструменту, $\Delta = 3 \text{ мм}$ [8];

Z – число зубів фрези, $z = 4$.

$$T_o = \frac{12 + 3 + 3}{800 \times 0,035 \times 4} 36 = 5,78 \text{ хв}$$

Режими на інші операції технологічного процесу заносимо в таблицю 1.6.

Таблиця 1.6 – Режими різання [8]

N Опер.	Найменування операції	t, мм	S _o , мм/об	v _д , м/хв	n _д , хв ⁻¹	T _o , хв
1	2	3	4	5	6	7
005	Заготівельна	-	-	-	-	-
010	Термічна обробка	-	-	-	-	-
015	Токарна з ЧПК	1	0,1	84,78	600	2,56
020	Токарна з ЧПК	1,0	0,2	24,2	530	1,43
025	Токарна з ЧПК	0,8	0,2	35,17	238	2,18
030	Токарна з ЧПК	0,8	0,1	35,17	238	3,56
035	Шліфувальна	0,05	0,005/0,08	18/35	50/1500	2,14
040	Шліфувальна	0,05	0,005/0,08	18/35	50/1500	2,14
045	Протяжна	4,6	0,1мм/зуб	5,22	-	15,78
050	Шліфувальна	0,02	0,005/0,08	18/35	50/1500	6,23
055	Свердлильна з ЧПК	9	0,07	12,43	440	5,81
060	Зубофрезерна з ЧПК	-	0,035 мм/зуб	19,34	800	5,78
065	Зубошліфувальна	0,02	0,03	7	800	12,4
070	Нітроцементация	-	-	-	-	-
080	Слюсарна	-	-	-	-	-
085	Мийна	-	-	-	-	-
090	Контрольна	-	-	-	-	-

В результаті виконання розрахунків були визначені та обґрунтовані оптимальні режими різання для всіх операцій спроектованого технологічного процесу. Детальний аналітичний розрахунок для токарної та свердлильної операцій на верстатах з ЧПК підтвердив можливість повного використання потужності сучасного обладнання та фізико-механічних властивостей твёрдосплавного інструменту. Розрахунок зубофрезерної операції дозволив

оптимізувати параметри обкочування для досягнення необхідного ступеня точності зубчастого вінця та заданої шорсткості профілю зуба.

1.7 Технічне нормування операцій

Технічне нормування операцій є одним із найважливіших етапів технологічної підготовки виробництва, який безпосередньо пов'язує прийняті інженерні рішення з економічними показниками виготовлення деталі. Головне завдання цього розділу полягає у визначенні технічно обґрунтованих норм часу на виконання кожної операції спроектованого технологічного процесу.

Штучно-калькуляційний час на операцію розраховуємо за формулами (1.44), (1.45) [9]:

$$t_{um-к.} = \frac{t_{nз}}{n} + t_{um.} \quad (1.44)$$

$$t_{um.} = t_o + t_{ecn} + t_{обс} + t_n \quad (1.45)$$

де $t_{um.}$ - штучний час, хв;

$t_{nз}$ — підготовчо-завершальний час, хв;

n — кількість деталей в партії, $n=60$ шт;

t_o — сумарний час на операцію, хв;

t_{ecn} — допоміжний час, хв;

$t_{обс}$ — час обслуговування робочого місця, хв;

t_n — час на особисті потреби, хв.

Технічне нормування на токарну операцію (015)

Основний сумарний час на операцію $t_o = 2,56$ хв

Допоміжний час за формулою 1.46 [9]:

$$t_{ecn.} = t_{e.y.} + t_{м.б.} \quad (1.46)$$

де $t_{e.y.} = 0,1$ хв — час на установку і зняття деталі в патроні з ручним затиском [9];

$t_{м.в.} = 0,19$ хв - час, пов'язаний з виконанням допоміжних ходів і переміщень при обробці поверхні [9]:

$$t_{всп} = 0,1 + 0,19 = 0,29 \text{ хв}$$

Час роботи верстата дорівнює неповному оперативному часу роботи верстата визначаємо за формулою (1.47) [9]:

$$\begin{aligned} t_{н.у.} &= t_o. + t_{м.в.} \\ t_{н.у.} &= 2,56 + 0,29 = 2,85 \text{ хв.} \end{aligned} \quad (1.47)$$

Час на обслуговування робочого місця за формулою (1.48) [9]:

$$\begin{aligned} t_{обс} &= 10\% \cdot t_{н.у.} \\ t_{обс} &= 0,1 \cdot 2,85 = 0,28 \text{ хв.} \end{aligned} \quad (1.48)$$

Час на відпочинок і природні потреби за формулою (1.49) [9]:

$$\begin{aligned} t_n &= 10\% \cdot t_{н.у.} \\ t_n &= 0,1 \cdot 2,86 = 0,28 \text{ хв.} \end{aligned} \quad (1.49)$$

Визначаємо штучний час на операцію:

$$t_{шт.} = 2,86 + 0,28 + 0,28 = 3,42 \text{ хв.}$$

Визначаємо підготовчо-завершальний час на операцію [9] за формулою (1.50):

$$T_{n-3} = T_{n-31} + T_{n-32} \quad (1.50)$$

де $T_{п-31} = 12$ хв – час на витрати по обслуговуванню верстата [9];

$T_{п-32} = 6$ хв – час на витрати, що враховують додаткові роботи [9].

$$T_{n-3} = 12 + 6 = 18 \text{ хв}$$

Штучно-калькуляційний час на операцію, хв

$$t_{шт.-к.} = \frac{18}{60} + 3,42 = 3,72 \text{ хв}$$

Технічне нормування на свердлувальну операцію (055)

Основний сумарний час на операцію $t_o = 5,81$ хв

Допоміжний час розраховуємо за формулою (1.46):

$t_{e.y.} = 0,15$ хв – час на установку і зняття деталі [9];

$t_{m.v.} = 0,16$ хв – час, пов'язаний з виконанням допоміжних ходів і переміщень при обробці поверхні [9]

$$t_{ecn} = 0,16 + 0,15 = 0,31 \text{ хв}$$

Час роботи верстата за програмою управління $t_{п.у}$ дорівнює неповному оперативному часу роботи верстата за формулою (1.47) [9]:

$$t_{n.y.} = 5,81 + 0,31 = 6,12 \text{ хв.}$$

Час на обслуговування робочого місця розраховуємо за формулою (1.51) [9]:

$$\begin{aligned} t_{обс} &= 8\% \cdot t_{n.y.} \\ t_{обс} &= 0,08 \cdot 6,12 = 0,5 \text{ хв.} \end{aligned} \quad (1.51)$$

Час на відпочинок і природні потреби за формулою (1.52) [9]:

$$\begin{aligned} t_n &= 8\% \cdot t_{n.y.} \\ t_n &= 0,08 \cdot 6,12 = 0,5 \text{ хв.} \end{aligned} \quad (1.52)$$

Визначаємо штучний час на операцію:

$$t_{um.} = 6,12 + 0,5 + 0,5 = 7,12 \text{ хв.}$$

Визначаємо підготовчо-завершальний час на операцію [9] за формулою (1.50): $T_{п-31} = 12$ хв – час на витрати для усіх верстатів з ЧПУ [9]; $T_{п-32} = 7$ хв – час на витрати, що враховують додаткові роботи [9])

$$T_{п-3} = 12 + 7 = 19 \text{ хв}$$

Штучно-калькуляційний час на операцію, хв

$$t_{um.-к.} = \frac{19}{60} + 7,12 = 7,44 \text{ хв}$$

Технічне нормування на зубофрезерну з ЧПК операцію (060)

Основний сумарний час на операцію 5,78 хв

Допоміжний час визначаємо за формулою (1.53) [9]:

$$t_{доп} = t_{0''} + t_{с.б.} + t_{в.у.} + t_{м.в.} \quad (1.53)$$

де $t_{0''} = 0,05$ хв - переміщення інструменту в «0» інструменту [9];

$t_{с.б.} = 0,05$ хв - час пов'язаний зі зміною блоку [9];

$t_{в.у.} = 1,2$ хв - час на установку і зняття деталі в патроні з пневматичним затиском [9];

$t_{м.в.} = 0,15$ хв - час, пов'язаний з виконанням допоміжних ходів і переміщень при обробці поверхні [9];

$$t_{всп} = 0,05 + 0,05 + 1,2 + 0,15 = 1,45 \text{ хв}$$

Час роботи верстата за програмою управління $t_{п.у.}$ рівно неповному оперативному часу роботи верстата визначаємо за формулою (1.47) [9]:

$$t_{п.у.} = 5,78 + 1,45 = 7,23 \text{ хв.}$$

Час на обслуговування робочого місця за формулою (1.51) [9]:

$$t_{обс} = 0,08 \times 7,23 = 0,58 \text{ хв}$$

Час на відпочинок і природні потреби за формулою (1.52) [9]:

$$t_n = 0,08 \times 7,23 = 0,58 \text{ хв.}$$

Визначаємо штучний час на операцію:

$$t_{ум.} = 7,23 + 0,58 + 0,58 = 8,39 \text{ хв.}$$

Визначасмо підготовчо-завершальний час на операцію за формулою (1.50): $T_{п-31} = 12$ хв - час на витрати для усіх верстатів з ЧПУ [9]; $T_{п-32} = 7$ хв - час на витрати додаткові роботи, що враховують, [9]:

$$T_{п-3} = 12 + 7 = 19 \text{ хв}$$

Штучно-калькуляційний час на операцію:

$$t_{ум.-к.} = \frac{19}{60} + 8,39 = 8,71 \text{ хв}$$

Результати розрахунків та нормування по іншим операціям наведено в таблиці 1.7.

Таблиця 1.7 – Технічне нормування операцій [9]

Номер операції	Найменування операції	Складові $T_{шт-к}$						
		t_o	t_d	$t_{оп}$	$t_{обсл}$	$t_{п}$	$t_{п-3}$	$t_{шт-к}$
015	Токарна з ЧПК	2,56	0,29	2,85	0,28	0,28	15	3,72
020	Токарна з ЧПК	6,85	1,78	8,63	0,69	0,69	17,5	9,07
025	Токарна з ЧПК	2,08	0,29	2,37	0,24	0,24	18	3,01
030	Токарна з ЧПК	3,42	2,31	5,73	0,46	0,46	20	7,15
035	Шліфувальна	0,15	2,1	2,25	0,18	0,18	18	3,06
040	Шліфувальна	0,15	2,1	2,25	0,18	0,18	18	3,06
045	Протяжна	11,3	2,71	14,01	1,12	1,12	20	16,75
050	Шліфувальна	0,32	1,25	1,57	0,024	0,063	12	1,96
055	Свердлильна ЧПК	5,81	0,31	6,12	0,5	0,5	19	7,44
060	Зубофрезерна	5,78	1,45	7,23	0,58	0,58	19	8,71
065	Зубошліфувальна	3,45	1,65	5,1	0,41	0,41	14	6,27

У результаті проведеного технічного нормування для всіх операцій технологічного процесу було визначено складові норми часу: основний

(технологічний), допоміжний, час на обслуговування робочого місця та регламентовані перерви, а також підготовчо-заключний час. Встановлені технічно обґрунтовані норми штучно-калькуляційного часу повною мірою відображають раціональне використання металорізального обладнання, зокрема його швидкісних характеристик під час обробки на верстатах з ЧПК. Отримані часові показники підтверджують загальну технологічну ефективність спроектованого процесу. Розраховані норми часу є надійною вихідною базою для побудови графіків завантаження обладнання, визначення необхідної кількості виробничого персоналу, а також для виконання підсумкових техніко-економічних розрахунків і калькулювання собівартості готової деталі.

1.8 Розробка керуючої програми на операцію з ЧПК

Розробка керуючої програми (КП) для свердлильної операції на верстаті з числовим програмним керуванням здійснювалась в автоматизованій системі підготовки виробництва Siemens NX. Використання сучасної САМ-системи дозволяє виключити помилки ручного програмування, оптимізувати траєкторії руху інструменту та скоротити час технологічної підготовки.

На першому етапі було створено технологічну збірку (Setup) та визначено геометрію оброблюваної деталі (Part) і заготовки (Blank). Для виконання свердлильної операції необхідно було вказати конструктивні елементи, що підлягають обробці. Як показано на рисунку 1.9, у робочому просторі моделі було виконано вибір системи наскрізних отворів на фланцевій частині деталі (один з обраних елементів підсвічено). Це визначає локальні зони обробки для генерації майбутньої траєкторії.

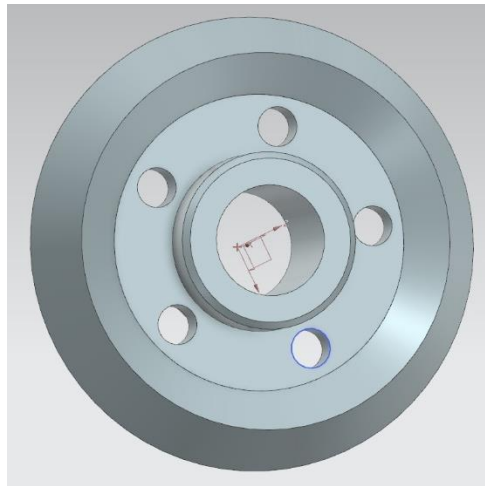


Рисунок 1.9 – 3D зображення операційного ескізу

Наступним кроком стало налаштування параметрів різального інструменту та визначення його просторової орієнтації. Для даної операції було обрано стандартне свердло (у системі задано як STD_DRILL). На рисунку 1.10 зображено процес позиціонування інструменту відносно вибраного отвору.

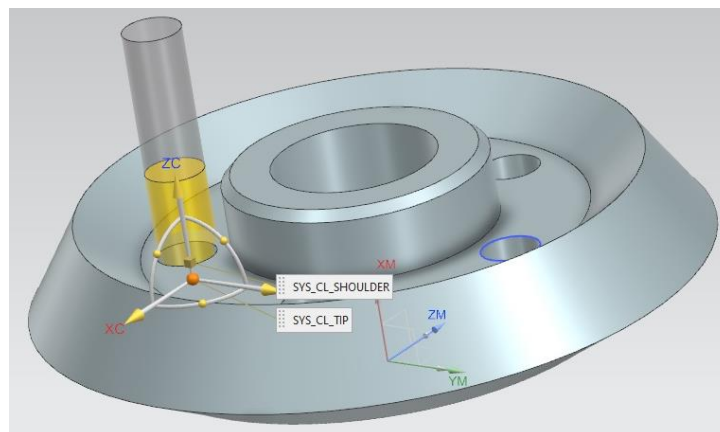


Рисунок 1.10 – Розташування інструменту відносно поверхні обробки

Після задання технологічних параметрів (режимів різання, стратегії обробки та площини безпеки) було здійснено розрахунок та генерацію траєкторії руху інструменту (рисунок 1-11). На наведеній візуалізації чітко

простежуються робочі ходи свердління (позначені суцільними лініями всередині отворів) та допоміжні холості переміщення на безпечній висоті між отворами (позначені пунктирними лініями). Алгоритм системи оптимізував порядок обходу отворів для мінімізації довжини холостих переміщень, що позитивно впливає на загальний штучний час виконання операції.

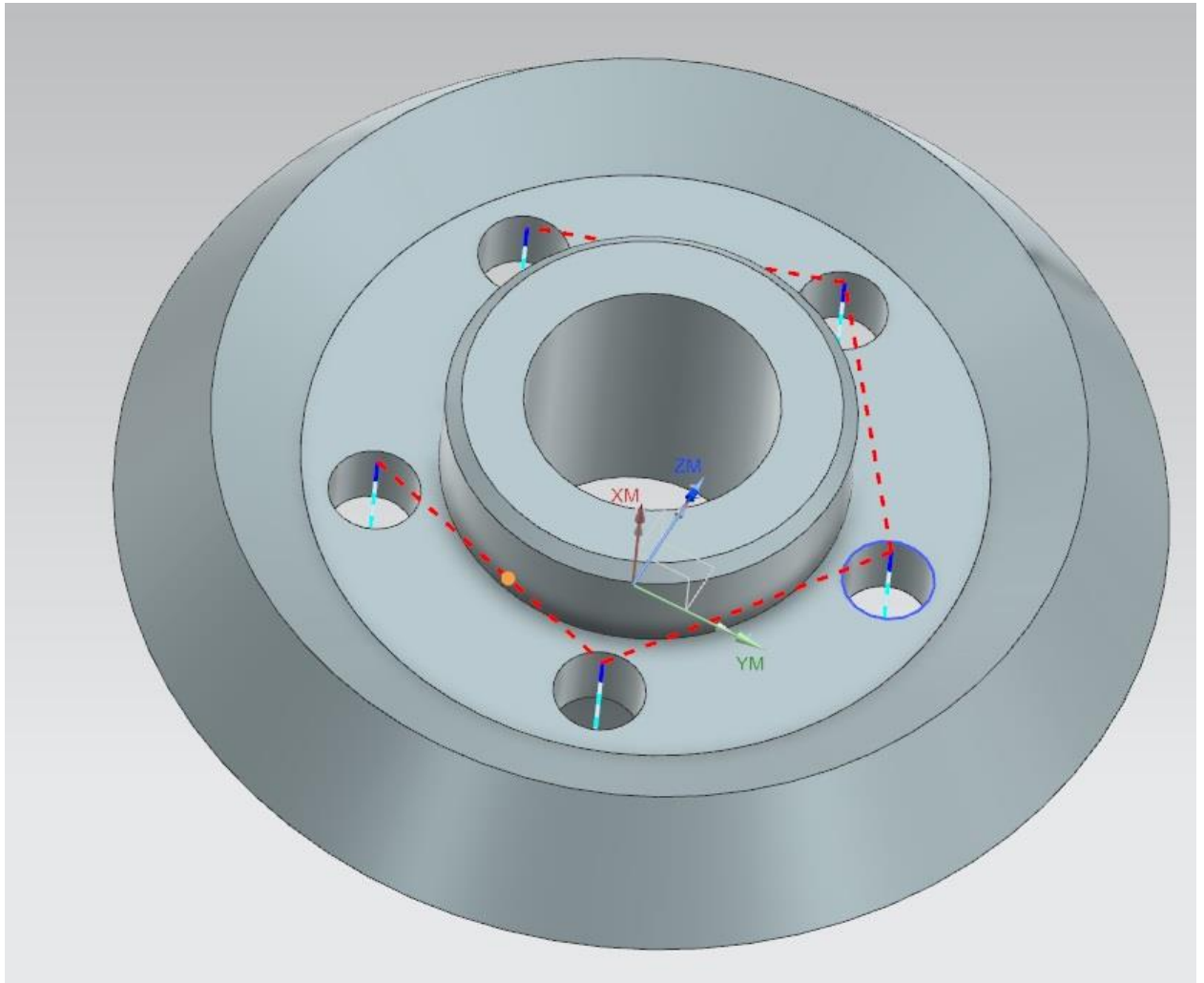


Рисунок 1.11 – Генерування траєкторії обробки

Заключним етапом підготовки є постпроцесування — перетворення розрахованої траєкторії з внутрішнього формату САМ-системи (CL-data) у стандартизовані G-коди, які розпізнаються системою ЧПК верстата. На рисунку 1-12 наведено фрагмент згенерованої керуючої програми.

```

N60 DEF REAL _camtolerance
N70 DEF REAL _X_HOME, _Y_HOME, _Z_HOME
N80 DEF REAL _F_CUTTING, _F_ENGAGE, _F_RETRACT
N90 ;
N100 G40 G17 G700 G90 G60 G601 FNORM
N110 ;Start of Path
N120 ;
N130 ;TECHNOLOGY: METHOD
N140 ;TOOL NAME : STD_DRILL
N150 ;TOOL TYPE : Drilling Tool
N160 ;TOOL DIAMETER : 0.708661
N170 ;TOOL LENGTH : 3.149606
N180 ;TOOL CORNER RADIUS: 0.000000
N190 ;
N200 ;Intol : 0.001181
N210 ;Outtol : 0.001181
N220 ;Stock : 0.000000
N230 _camtolerance=0.002362
N240 _X_HOME=0.0 _Y_HOME=0.0 _Z_HOME=0.0
N250 ;
N260 ;
N270 ;Operation : DRILLING
N280 ;
N290 TRAFOOF
N300 SUPA G0 Z=_Z_HOME D0
N310 SUPA G0 X=_X_HOME Y=_Y_HOME D0
N320 ;First Tool
N330 T="STD_DRILL"
N340 M6
N350 MSG("METHOD")
N360 TRAFOOF
N370 SUPA G0 Z=_Z_HOME D0
N380 SUPA G0 X=_X_HOME Y=_Y_HOME D0
N390 ;
N400 ;Initial Move
N410 CYCLE832(_camtolerance,0,1)
N420 TRAFOOF
N430 G54
N440 G0 X2.0669 Y-1.7034 S0 D0 M3
N450 Z1.2052
N460 F9.8
N470 MCALL CYCLE81(1.2052,1.2052,0.1181,1.2052)
N480 X1.6732 Y-1.7034
N490 Y.6198
N500 Y2.0864
N510 V 6507

```

Рисунок 1.12 – Лістинг керуючої програми в G-код

Згенерована керуюча програма не містить зарізвань, відповідає кінематиці обраного обладнання та повністю готова до передачі на верстат для виготовлення деталі.

2 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

2.1.1 Конструкція і принцип роботи пристосування.

Конструкція спеціального верстатного пристрою з пневматичним приводом показано на рисунку 2.1.

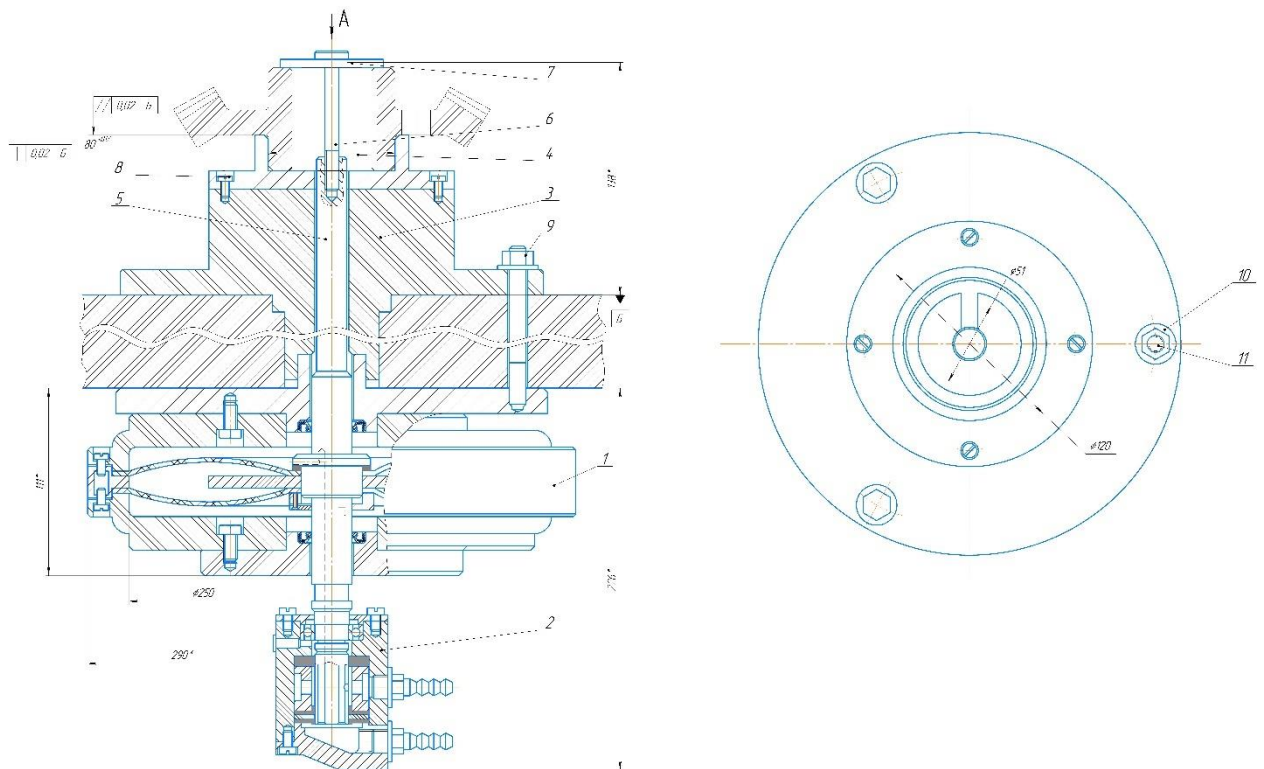


Рисунок 2.1 – Конструкція спеціального пристосування для фрезерування зубців

Пристосування призначено для точного базування та надійного закріплення заготовки типу «зубчасте колесо» під час виконання зубообробної операції. Використання даного оснащення дозволяє суттєво скоротити допоміжний час на встановлення деталі та забезпечити високу стабільність процесу різання. Пристрій монтується безпосередньо на робочий стіл зубофрезерного верстата і має наскрізну компоновку, за якої силовий пневматичний циліндр розташований під площиною столу, а робочий

затискний вузол знаходиться над ним, що оптимізує робочий простір. Робочий цикл починається з етапу базування: заготовка встановлюється своїм центральним базовим отвором на спеціальну центрувальну оправку (4) і доводиться до щільного упору в горизонтальну площину опорного корпусу (3), що дозволяє нівелювати можливе торцеве биття. Після цього на верхній торець заготовки встановлюється швидкознімна натискна шайба (7). Наступним етапом є автоматизоване затискання, під час якого через штуцери спеціальної обертової муфти (2) стиснене повітря від цехової магістралі подається в робочу порожнину пневмокамери (1). Під дією надлишкового тиску еластична гумовотканинна діафрагма деформується і трансформує пневматичну енергію в механічне зусилля, тягнучи центральну тягу (5) вертикально вниз паралельно осі А. Ця тяга через з'єднувальний гвинт (6) передає тягове зусилля на натискну шайбу (7), яка здійснює остаточну жорстку фіксацію заготовки на технологічній базі, запобігаючи її зміщенню під дією сил різання. Під час виконання робочого ходу стіл верстата починає задане технологічне обертання для реалізації кінематики обкочування або кругової подачі разом із закріпленим пристроєм. При цьому повітроприймальна муфта (2) вільно обертається на підшипникових опорах відносно нерухомого корпусу зі штуцерами, гарантуючи безперервну подачу повітря та сталу величину затискного зусилля протягом усієї операції. Після повного завершення циклу нарізання зубчастого вінця відбувається етап розтискання: тиск стисненого повітря в робочій порожнині пневмокамери (1) скидається в атмосферу. За рахунок зворотної дії пружини або подачі повітря у протилежну порожнину шток і тяга (5) переміщуються у верхнє вихідне положення, звільняючи натискну шайбу (7) від натягу. Наприкінці циклу оператор знімає натискну шайбу та вільно демонтує готову деталь з базуючої оправки для подальшого встановлення наступної заготовки.

2.1.2 Визначення похибки базування та закріплення. Розрахунок пристосування на точність.

Теоретична схема базування для розрахунку на точність пристосування показана на рисунку 2.2.

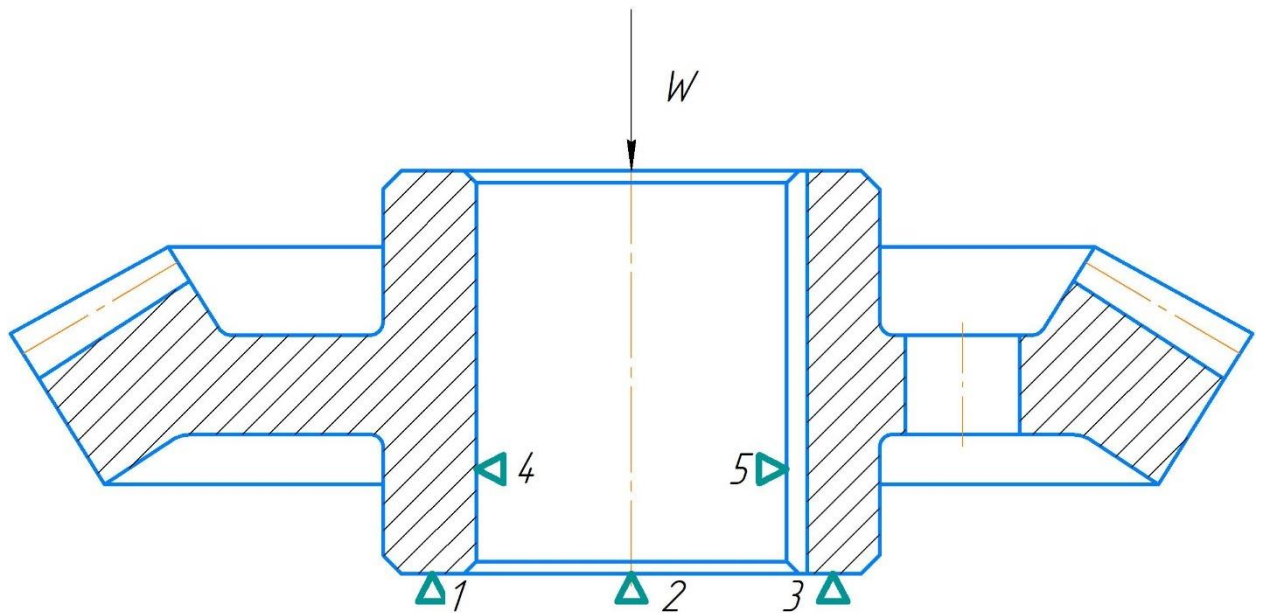


Рисунок 2.2 – Схеми для визначення похибки базування та розрахунку пристосування на точність

Зубчасте колесо встановлюється в пристрої за наступною схемою базування: головна установча база (3 точки контакту): Опорний торець заготовки, який контактує з точно обробленою площиною корпусу пристрою (поз. 3). Позбавляє заготовку трьох ступенів вільності (переміщення вздовж осі Z та обертання навколо осей X і Y); подвійна опорна база (2 точки контакту): Центральний базовий отвір заготовки, який встановлюється на жорстку циліндричну оправку (поз. 4). Позбавляє заготовку двох ступенів вільності (переміщення вздовж осей X та Y); обертання навколо власної осі Z для даної операції не позбавляється (або фіксується силами тертя), оскільки

зубофрезерування потребує рівномірного обертання столу верстата разом із деталлю.

При зубофрезеруванні відповідальним параметром є радіальне биття зубчастого вінця відносно осі базового отвору. Оскільки деталь встановлюється на жорстку оправку (поз. 4) по посадці з гарантованим зазором, вісь отвору заготовки може зміститися відносно осі оправки на величину радіального зазору.

Похибка базування в радіальному напрямку для посадки з зазором визначається за формулою (2.1) [10]:

$$\varepsilon_6 = S_{\max} + e \quad (2.1)$$

де: $S_{\max}$ — максимальний діаметральний зазор між отвором заготовки та оправкою, який визначаємо за формулою (2.2), мм [10];

e — ексцентриситет зміщення осі базуючого елемента, мм для жорсткої оправки приймається $e = 0$

$$S_{\max} = D_{\max} - d_{\min} \quad (2.2)$$

де: $D_{\max}$ - максимальний діаметр посадочного отвору на пристосуванні,

$D_{\max} = 80,2 \text{ мм}$;

$d_{\min}$ — мінімальний діаметр зовнішньої циліндричної посадочної поверхні зубчатого колеса $d_{\min} = 79,26 \text{ мм}$

$$S_{\max} = 80,2 - 79,26 = 0,94 \text{ мм}$$

$$\varepsilon_6 = 0,94 \text{ мм}$$

У даній конструкції сила закріплення W діє перпендикулярно до установчої площини (вздовж осі Z). Отже, похибка закріплення у напрямку розміру який необхідно витримати (для радіального биття та профілю зуба у площині $X-Y$) дорівнює нулю: $\varepsilon_3 = 0 \text{ мм}$

Визначимо допустиму похибку виготовлення пристрою $[\varepsilon_{\text{пр}}]$, при якій буде гарантовано забезпечена точність механічної обробки деталі.

Основна умова точності виконання операції визначається за формулою (2.3) [10]:

$$\varepsilon_{\text{пр}} \leq \delta_{\text{Т}} - \omega \quad (2.3)$$

де: $\varepsilon_{\text{пр}}$ — сумарна похибка встановлення заготовки, мм;

$\delta_{\text{Т}}$ — допуск на виконуваний розмір, мм $\delta_{\text{Т}} = 0,2\text{мм}$;

ω — середня економічна точність методу обробки (зубофрезерування),

$\omega = 0,12\text{мм}$ [10].

Сумарна похибка встановлення за формулою (2.4) [10]:

$$\varepsilon_{\text{вст}} = \sqrt{\varepsilon_6^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_{\text{пр}}^2} \quad (2.4)$$

Звідси похибку пристосування визначимо за формулою (2.5) [10]:

$$\begin{aligned} [\varepsilon_{\text{пр}}] &= \sqrt{\varepsilon_6^2 + \varepsilon_3^2 + (\delta_{\text{Т}} - \omega)^2} \\ [\varepsilon_{\text{пр}}] &= \sqrt{0,94^2 + 0 + 0,08^2} = 0,94\text{мм} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Для забезпечення необхідної точності на даній операції похибка пристосування повинна бути меншою за $[\varepsilon_{\text{пр}}] = 0,94\text{мм}$

2.1.3 Визначення необхідної сили затиску. Вибір приводу.

Встановлення на жорстке циліндричне кільце – одна з основних схем для деталей, що мають точно оброблений отвір і торець. Для утримання деталі в процесі обробки необхідно, щоб моменти тертя на опорних

поверхнях перевищували моменти різання. Методика визначення необхідних сил закріплення ґрунтується на використанні принципу статичної рівноваги. Розрахункова схема для визначення сили закріплення показана на рисунку 2.3.

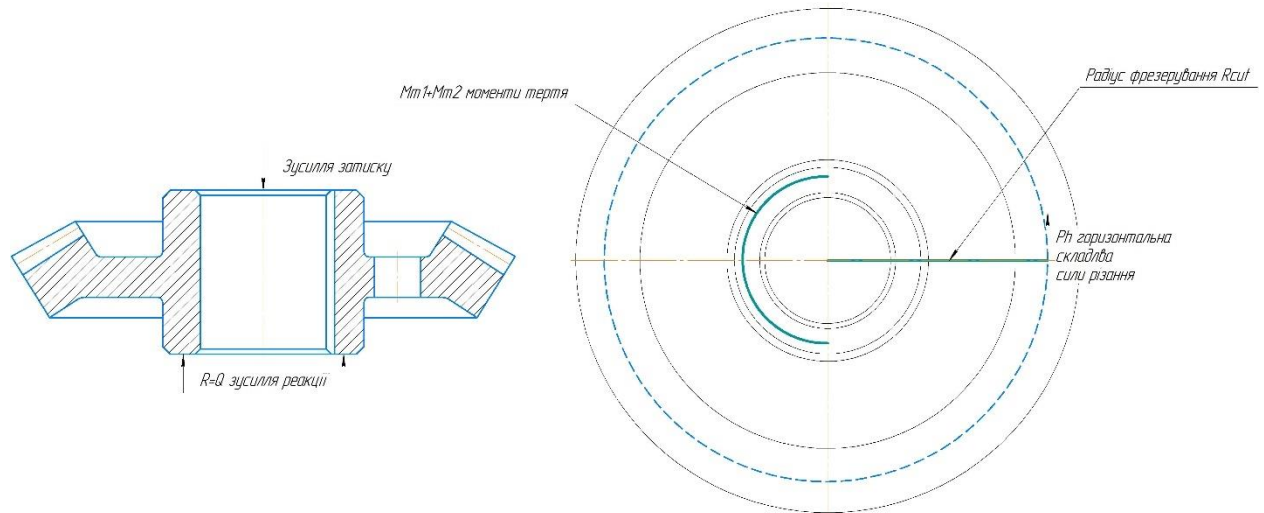


Рисунок 2.3 – Розрахункова схема для пристосування для зубофрезерування

Для запобігання провертанню та зсуву від дії крутного моменту M і осьової сили необхідно прикласти силу $W_{ст}$ яку розраховуємо за формулою (2.6), Н [11]:

$$W_{cm} = \frac{Ph \cdot R}{\frac{f}{3} \cdot \frac{(D^3 - d^3)}{(D^2 - d^2)}} \quad (2.6)$$

де Ph – горизонтальна складова сили різання розраховуємо за формулою (2.7), Н;

R – радіус заготовки, $R = 87,2$ мм;

D – максимальний опорний діаметр, $D = 90,8$ мм;

d – мінімальний опорний діаметр, $d = 75$ мм;

f – коефіцієнт тертя, $f = 0,25$ [11];

$$Ph = 10C_p m^{Xp} So^{Yp} \quad (2.7)$$

де C_p – коефіцієнт, який враховує матеріал заготовки;

m – модуль колеса, мм;

So – подача на оборот заготовки, мм;

Xp, Yp – коефіцієнт модуля та подачі на оберт.

Відповідно [11] $So = 0,5$ мм/об, за паспортом верстату $So = 0,2$ мм/об. Коефіцієнти знаходимо за [11] довідника.

$$Pz = 10 \cdot 82 \cdot 6,25^{0,75} \cdot 0,2^{0,6} = 1233H$$

$$W_{cm} = \frac{1233 \cdot 87,2}{\frac{0,25}{3} \cdot \frac{(90,8^3 - 75^3)}{(90,8^2 - 75^2)}} = 10348H$$

У пристосуванні затиск відбувається від пневматичного приводу, який повинен забезпечувати необхідну силу затиску $W_o = 10348$ Н. Мінімальний діаметр пневматичної камери визначаємо за формулою (2.8), мм [11]:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot P_{шт}}{\pi \cdot p \cdot \eta}} \quad (2,8)$$

де $P_{шт} = W_d$ – сила на штоці пневматичної камери, Н

p – тиск повітря в системі, $p = 0,4$ МПа

η – коефіцієнт, який враховує втрати тиску в системі, $\eta = 0,9$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 10348}{3,14 \cdot 0,4 \cdot 0,9}} = 234_{мм}$$

Діаметр $D = 250$ мм. За нормативними даними приймаємо пневмокамеру: Камера 7030-0045.

2.2.1 Конструкція і принцип роботи контрольного пристосування

Схематичне зображення контрольного пристосування для вимірювання профілю зубів зубчастого колеса показано на рисунку 2.4.

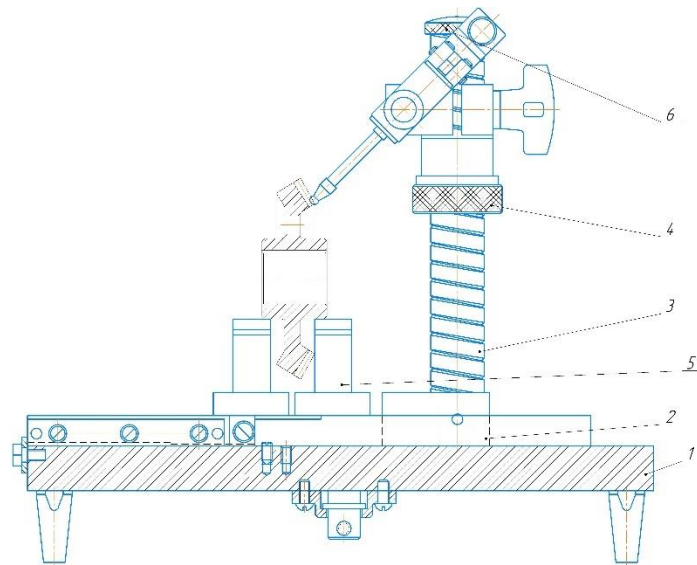


Рисунок 2.4 – Схема контрольного пристосування для вимірювання профілю зубців

Принцип дії контрольного пристосування базується на контактному вимірюванні відхилень дійсного профілю зуба від номінального. Процес контролю починається з точного базування деталі, яку встановлюють маточиною на призми (5). Після фіксації деталі здійснюється грубе налаштування: вимірювальний вузол за допомогою рухомої каретки (2) переміщують по базовій плиті (1) у горизонтальній площині на необхідну координату відносно деталі. Далі виконується точне налагодження: обертанням регулювальної гайки (4) по гвинтовій колоні (3) вимірювальну головку (6) плавно опускають до моменту, поки її сферичний щуп не увійде в

щільний контакт із заданою точкою на бічній поверхні зуба, після чого шкалу приладу виставляють на «нуль». Безпосередньо під час вимірювання щуп переміщують уздовж профілю зуба, і всі просторові відхилення реальної поверхні від еталонної передаються через важіль на індикатор (6), який відображає лінійну величину похибки на своєму циферблаті.

2.3 Розрахунок на міцність деталі.

Розрахунок на міцність є одним із найважливіших етапів проєктування деталей машин, що дозволяє обґрунтовано оцінити їхню надійність, довговічність та працездатність під дією експлуатаційних навантажень. У даному розділі проведено перевірочний розрахунок напружено-деформованого стану (НДС) зубчастого колеса. Дослідження виконано на базі сучасного методу скінченних елементів (МСЕ) з використанням інструментів CAE-модуля інтегрованої системи Siemens NX. Цей підхід дозволяє з високою точністю змодельовати фізичні процеси та визначити зони найбільшої концентрації напружень без необхідності створення дорогих фізичних прототипів.

Основою для проведення інженерного аналізу стала твердотільна 3D-модель зубчастого колеса (рис. 2.5). Модель повністю відтворює всі конструктивні та технологічні особливості реальної деталі: зубчастий вінець, центральну маточину, шпонковий паз для передачі крутного моменту від вала, а також полегшуючі отвори на диску, які слугують для зменшення загальної маси конструкції.

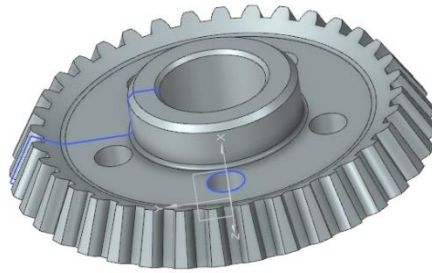


Рисунок 2.5 – Тривимірна модель зубчастого колеса

Для виконання розрахунків за МСЕ суцільне середовище деталі було розбито на скінченні елементи. Як показано на рисунку 2.6, на модель накладено просторову тетраедральну (tetrahedral) скінченно-елементну сітку. Густота та розмір елементів сітки підібрані таким чином, щоб забезпечити оптимальне співвідношення між точністю математичних обчислень та витратами машинного часу. Сітка згенерована рівномірно з достатньою деталізацією в зонах складної геометрії (на профілях зубців та біля отворів) для коректного відображення градієнтів напружень.

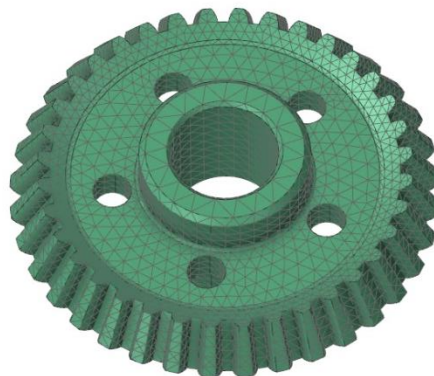


Рисунок 2.6 – Розбивка деталі сіткою скінченних елементів

Адекватність результатів МСЕ безпосередньо залежить від правильності задання розрахункової схеми. На рисунку 2.7 відображено процес прикладання граничних умов та експлуатаційних навантажень. Для

імітації встановлення деталі на вал, її було жорстко зафіксовано по внутрішній циліндричній поверхні маточини та по робочих гранях шпонкового паза (позначено синіми маркерами). Це обмежує всі ступені вільності деталі в цих вузлах (жорстке закріплення). Як зовнішнє силове навантаження було задано розподілене зусилля (позначено червоними векторами), прикладене до бічних поверхонь зубців. Воно моделює контактні зусилля в зубчастому зачепленні, які виникають при передачі крутного моменту від сполученого колеса.

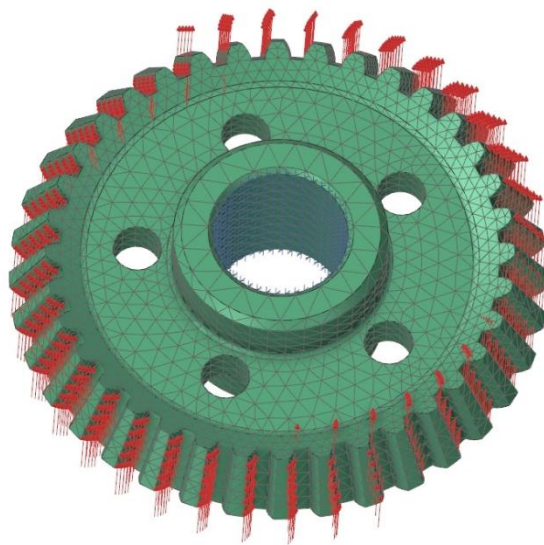


Рисунок 2.7 – Накладення навантаження та обмежень

Після запуску процесора (Solution 1: Statics 1) було отримано кольорові контурні епюри розподілу еквівалентних напружень у тілі деталі (рисунок 2.8). Розрахунок напружень виконано за енергетичною теорією міцності фон Мізеса (Von Mises), яка є класичною для оцінки міцності пластичних матеріалів (конструкційних сталей). Колірна шкала зліва відображає інтенсивність напружень у мегапаскалях (МПа). Аналіз епюри показує, що напруження по тілу деталі розподіляються нерівномірно. Основний масив диска колеса забарвлений у сині та блакитні кольори, що свідчить про мінімальний рівень напружень (від 0,039 до 1,6 МПа). Зони концентрації напружень (жовто-червоні ділянки) прогнозовано локалізовані біля основи

навантажених зубців, а також в околицях полегшуючих отворів та на галтелях переходу маточини у диск. Максимальне значення еквівалентних напружень в цих зонах становить 6,526 МПа.

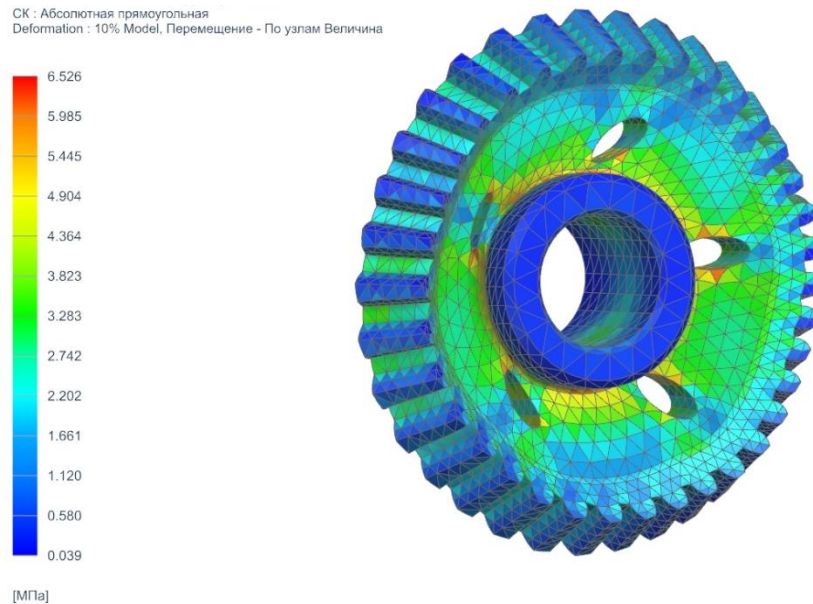


Рисунок 2.8 – Результат розрахунку на міцність

За результатами проведеного CAE-аналізу в системі Siemens NX можна зробити висновок, що конструкція зубчастого колеса є абсолютно надійною. Отримане максимальне значення напруження (6,526 МПа) є вкрай малим і лежить глибоко в межах пружної деформації. Порівнюючи це значення з границею плинності типових конструкційних сталей (яка для сталі 45 становить близько 340...360 МПа), бачимо, що деталь має високий запас міцності при заданих режимах навантаження. Це гарантує безвідмовну роботу вузла та відсутність пластичних деформацій чи руйнувань в процесі експлуатації. За необхідності оптимізації виробу, цей запас міцності дає змогу додатково зменшити матеріаломісткість деталі.

3 РОЗРОБКА ПЛАНУВАННЯ ДІЛЬНИЦІ

Виходячи із заданих обсягів програми випуску, на попередньому етапі приймаємо багатосерійний тип виробництва, що має змінно-потоккову форму організації процесу (згідно з п. 1.2). У межах даної ділянки передбачається механічна обробка групи деталей типу «зубчасте колесо»:

Початкові параметри та результати обчислень зведено в таблицю 3.1.

Наступним кроком є остаточне затвердження типу та організаційної форми виробництва. З цією метою слід розрахувати потрібну кількість технологічного обладнання (верстатів) для виготовлення представленої групи деталей, з'ясувати фактичний та середній коефіцієнти завантаження, а також обчислити коефіцієнт закріплення операцій.

Обчислення річної верстатомісткості для кожного виду технологічних операцій виконується за наведеною нижче залежністю (3.1) [12]:

$$t_{ш-к_j} = \sum_{j=1} t_{ш-к_j} \cdot N_j \quad (3.1)$$

де: $t_{ш-к_i}$ - штучно – калькуляційний час обробки однієї деталі на поточній операції;

N_j - річна програма випуску.

За таким самим алгоритмом проводяться розрахунки і для інших операцій. Потрібну кількість верстатів на кожну технологічну операцію обчислюють за допомогою наступної формули (3.2) [12]:

$$C_{pi} = \frac{t_{ш-к_i} \cdot N}{F_{эф} \cdot 60} \quad (3.2)$$

де i – номер технологічної операції або вид механічної обробки;

N – річна програма випуску, $N=5000$ шт;

F_{ef} – ефективний фонд роботи, $F_{ef}=4015$ ч [12];

Коефіцієнт завантаження верстату визначається за формулою (3.3) [12]:

$$K_3 = \frac{C_{p_i}}{C_{pp_i}} \quad (3.3)$$

де C_{pp} – прийнята кількість обладнання на поточній операції.

За таким самим алгоритмом проводяться розрахунки і для інших операцій. Результати розрахунків зводимо до таблиці 3.1.

Середній коефіцієнт завантаження визначаємо за формулою (3.4) [12]:

$$\overline{K_3} = \frac{\sum C_p}{\sum C_{pp}} \quad (3.4)$$

$$\overline{K_3} = \frac{9,65}{18} = 0,54$$

Таблиця 3.1 – Розрахунок необхідної кількості технологічного обладнання та його завантаження [12]

Вихідні данні	Група деталей	Річна програма випуску N , <i>шт</i>	Номер операції, i										
			15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
			Модель станка										
			Ток. с ЧПК СК6140	Ток. с ЧПК СК6140	Ток. с ЧПК СК6140	Ток. с ЧПК СК6140	Плоскошліфувальний МУ3060	Плоскошліфувальний МУ3060	Протяжний 7Б56	Шліфувальний 3М227ВФ2	Оброблюючий центр VMC640	Зубофрезерний верстат з ЧПК GearSpecSF350CNC	Зубошліфувальний верстат Kesel RG-2400
			Верстатомісткість (штучно-кальculaційний час), $xв$										
	Колесо зубчасте	5000	3,72	9,07	3,01	7,15	3,06	3,06	16,75	1,96	7,44	8,71	6,27
	Шестерня привідна	5000	5,3	9,3	8,7	8,8	7,6	6,7	10,3	12,7	3,1	8,3	12,2
Шестерня конічна	5000	5,4	5,7	11,8	15,3	19,7	1,2	19,5	9,5	2,56	9,1	17,1	
Шестерня ведома	5000	2,8	12,85	2,42	18,68	20,11	2,44	9,98	10,13	8,83	5,68	3,61	
Результати розрахунків	$\sum_{j=1} t_{шт-к_j} \cdot N_j$		86100	184600	129650	249650	252350	67000	282650	169450	109650	158950	195900
	C_{pi}		0,36	0,76	0,54	1,04	1,05	0,28	1,17	0,7	0,46	0,66	0,81
	$C_{прi}$		1	1	1	2	2	1	2	1	1	1	1
	K_{3i}		0,36	0,76	0,54	0,52	0,53	0,28	0,59	0,7	0,46	0,66	0,81

Розрахуємо кількість деталей-операцій, які виконуються на даній дільниці [12]:

$$O=11 \times 4 + 2=46 \text{ деталі - операції.}$$

$$\text{Кількість робочих місць } M = \sum S_n = 11.$$

Розрахуємо коефіцієнт закріплення операції за формулою (3.5) [12]:

$$K_{zo} = \frac{O}{M} = \frac{46}{11} = 4,18 \quad (3.5)$$

Зважаючи на те, що розрахунковий коефіцієнт закріплення операцій становить $K_{zo} = 4,18$ (що потрапляє в нормативний діапазон $K_{zo} < 10$), дане виробництво обґрунтовано класифікується як багатосерійне. Це повністю підтверджує попередньо прийняті рішення. Відповідно, на спеціалізованій дільниці механічної обробки групи зубчастих коліс доцільно впровадити змінно-потоккову форму організації робіт, яка забезпечить необхідну ритмічність випуску та дозволить мінімізувати міжопераційні простої.

Що стосується технологічного оснащення, то наявний верстатний парк, залучений до технологічного процесу виготовлення деталі типу «зубчасте колесо», характеризується належним рівнем ефективності та повністю задовольняє вимоги щодо точності обробки. Враховуючи задані умови виробництва, обсяги річної програми випуску та конкретний розмір партії, радикальне оновлення або заміна існуючого обладнання на дорожчі аналоги на цьому етапі визнається технічно та економічно нераціональною. Використання поточних верстатів дозволяє уникнути невиправданих капітальних витрат і забезпечити прийнятну собівартість готової продукції.

4. ОЦІНКА ОЧІКУВАНОЇ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБКИ АБО ЗАХОДІВ

З метою забезпечення необхідної точності механічної обробки та гарантованого зусилля закріплення заготовки на фрезерній операції, розроблений технологічний процес виготовлення зубчастого колеса передбачає застосування механізованого оснащення. Зокрема, базове ручне пристосування було замінено на конструкцію, оснащену пневматичним затискачем.

Процес підготовки виробництва нерозривно пов'язаний із раціональним вибором засобів оснащення, які мають відповідати жорстким критеріям точності та надійності для кожного окремого етапу. Варто зазначити, що використання високопродуктивних, але складних спеціальних пристроїв не завжди є доцільним. Якщо програма випуску деталей є незначною, впровадження такого обладнання призводить не до зменшення, а до збільшення технологічної вартості операції.

Критерієм економічної ефективності пристосування є позитивна різниця між економією та витратами на його експлуатацію впродовж року. Витратна частина формується з амортизації пристрою та вартості його поточного утримання. Джерелом економії виступає скорочення часу (трудомісткості) виконання операції. Таким чином, модернізація вважається економічно виправданою, якщо зниження витрат на оплату праці перевищує додаткові річні витрати на обслуговування нового оснащення.

Розрахунок витрат на застосування впровадженого технологічного оснащення виконано згідно з наступним виразом 4.1 [12]:

$$C_a = Z_a \times \left(1 + \frac{H}{100}\right) + \frac{S_a}{\Pi} \times \left(\frac{1}{A} + \frac{q}{100}\right) \quad (4.1)$$

Розрахунок витрат на застосування старого технологічного оснащення виконано згідно з наступним виразом 4.2 [12]:

$$C_B = Z_B \times \left(1 + \frac{H}{100}\right) + \frac{S_B}{P} \times \left(\frac{1}{A} + \frac{q}{100}\right) \quad (4.2)$$

де Z_a , Z_b – заробітна плата робітника за одну деталь відповідно для нового та старого пристосування, грн;

H - цехові накладні витрати у % до заробітної плати;

S_a , S_b – витрати на виготовлення відповідно нового та старого пристосувань, грн;

P - річна програма випуску деталей, шт;

A - строк амортизації пристосування в роках;

q - витрати, пов'язані з експлуатацією пристосувань (ремонт, регулювання, зберігання) у % від їх вартості.

Вартість виготовлення запроєктованого технологічного оснащення розрахуємо, використовуючи спрощену методику, за такою залежністю 4.3 [12]:

$$S = C_{\Pi} \times N \quad (4.3)$$

де S - витрати на виготовлення пристосування, грн.

N - кількість деталей в пристосуванні, шт;

C_{Π} - затрати на одну деталь пристосування, грн;

Оскільки конструктивне виконання і нового, і вихідного пристроїв не відрізняється високою складністю форм $C_{\Pi}=75$ грн [12].

$$S_{\text{стар}} = 75 \times 21 = 1575 \text{грн}$$

$$S_{\text{нов}} = 75 \times 26 = 1950 \text{грн}$$

Підрахування заробітної плати робітника виконуємо за формулою (4.4) [12]:

$$З = t_{\text{шт}} * З_{\text{хв}} \quad (4.4)$$

де $t_{\text{шт}}$ – штучно-калькуляційний час на операції, $t_{\text{шт}}=12,15\text{хв}$;

$З_{\text{хв}}$ – хвилинна ставка робітника, виходячи з того, що робота виконується за 5 розрядом то $З_{\text{хв}}=65,1$ грн

$$З_{\text{стар}} = 14,31 * \frac{65,1}{60} = 15,53\text{грн}$$

$$З_{\text{нов}} = 8,71 * \frac{65,1}{60} = 9,45\text{грн}$$

Спираючись на нормативи розрахунку економічної доцільності, період амортизації для наявного та модернізованого пристроїв затверджено тривалістю в один рік, оскільки обидві конструкції класифікуються як нескладні [12].

Річні витрати на утримання та експлуатацію оснащення (q) складають 20 % від його початкової ціни (S) [12]. Відповідно, ці показники дорівнюють: $q_{\text{стар.}} = 315$ грн, а $q_{\text{нов.}} = 390$ грн.

Показник цехових накладних витрат у відсотках (H) обчислюється пропорційно — шляхом ділення сумарних річних накладних витрат по підрозділу (цеху) на річну суму основної зарплати виробничого персоналу (як правило, це значення варіюється в межах $H = 200...300 \%$) [12].

Розрахуємо собівартості за кожним із варіантів за формулами 4.1 та 4.2:

$$C_{\text{стар}} = 15,53 * \left(1 + \frac{250}{100}\right) + \frac{1575}{5000} * \left(\frac{1}{1} + \frac{315}{100}\right) = 55,67\text{грн}$$

$$C_{\text{нов}} = 9,45 * \left(1 + \frac{250}{100}\right) + \frac{1950}{5000} * \left(\frac{1}{1} + \frac{390}{100}\right) = 34,98\text{грн}$$

Розрахуємо економічний ефект від застосування нового пристосування за формулою (4.5) [12]:

$$E_{\text{еф}} = (C_{\text{стар}} - C_{\text{нов}}) \times N \quad (4.5)$$

$$E_{\text{еф}} = (55,67 - 34,98) \times 5000 = 103450 \text{ грн}$$

Для визначення більш вигідного пристосування, скористуємося формулою (4.6):

$$P_k = \frac{(S_{\text{нов}} - S_{\text{стар}}) \times \left(\frac{1}{A} + \frac{q}{100} \right)}{(3_{\text{стар}} + 3_{\text{нов}}) \times \left(1 + \frac{H}{100} \right)} \quad (4.6)$$

$$P_k = \frac{(1950 - 1575) \times \left(\frac{1}{1} + \frac{390}{100} \right)}{(15,53 + 9,45) \times \left(1 + \frac{250}{100} \right)} = 21,01 \text{ дет.}$$

На основі проведених техніко-економічних розрахунків можна стверджувати, що впровадження механізованого пристосування з пневматичним затискачем замість базового ручного на фрезерній операції є повністю виправданим. Незважаючи на те, що капітальні витрати на виготовлення нового оснащення зросли порівняно з базовим (1950 грн проти 1575 грн), це компенсується значним скороченням часу виконання операції. Завдяки цьому витрати на заробітну плату робітника за одну деталь знизилися з 15,53 грн до 9,45 грн, що привело до зменшення загальної технологічної собівартості обробки однієї заготовки з 55,67 грн до 34,98 грн. У результаті таких змін сумарний річний економічний ефект від застосування модернізованого пристосування становить 103450 грн. Крім того, розрахована критична програма випуску, за якої витрати на обидва пристосування зрівнюються, дорівнює лише 21,01 шт. Оскільки фактична річна програма випуску в 5000 деталей багатократно перевищує цю критичну

межу , зниження витрат на оплату праці повністю перекриває додаткові витрати на експлуатацію нового оснащення , що беззаперечно підтверджує високу рентабельність та успішність запроєктованого технологічного рішення.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці в машинобудівній галузі є невід'ємною, фундаментальною та критично важливою складовою загальної системи організації, управління та функціонування будь-якого сучасного промислового виробництва. Головною метою розробки комплексу заходів з охорони праці при проектуванні технологічного процесу виготовлення зубчастого колеса із конструкційної легованої сталі марки 40Х є створення максимально безпечних, нешкідливих та комфортних умов для щоденної роботи виробничого персоналу. Сюди входить запобігання виникненню професійних захворювань, радикальне зниження рівня виробничого травматизму, а також забезпечення абсолютної пожежної, електричної та загальної техногенної безпеки на спеціалізованій ділянці механічної обробки. Реалізація цих завдань ґрунтується на суворому, неухильному дотриманні чинного законодавства України, зокрема Закону України «Про охорону праці», Кодексу законів про працю, а також розгалуженого комплексу державних стандартів, санітарних норм та правил.

Відповідно до нормативних документів, усі потенційно небезпечні та шкідливі виробничі фактори, що можуть впливати на працівників під час реалізації спроектованого маршруту виготовлення деталі, класифікуються на фізичні, хімічні та психофізіологічні. До фізичних небезпечних та шкідливих факторів на даній ділянці належать насамперед рухомі частини технологічного обладнання та різальний інструмент. Високошвидкісне обертання шпинделів токарних верстатів із числовим програмним керуванням моделі SK6140, складний кінематичний рух черв'ячних фрез на зубофрезерному верстаті GearSpect SF350CNC, високошвидкісне обертання абразивних шліфувальних кругів на плоскошліфувальному верстаті MY3060 та зубошліфувальному верстаті Kesel RG-2400, а також значні лінійні

переміщення важкої протяжки на горизонтально-протяжному верстаті моделі 7Б56 створюють пряму, безпосередню загрозу механічного травмування операторів у разі порушення ними правил експлуатації.

Обробка легованої сталі на чорнових та напівчистових токарних операціях супроводжується інтенсивним утворенням гарячої зливної або сегментної стружки з надзвичайно гострими краями, яка відлітає під високим тиском із зони різання. Враховуючи, що розрахункова швидкість точіння досягає майже вісімдесяти п'яти метрів за хвилину, існує висока ймовірність ураження очей, обличчя та відкритих шкірних покривів оператора при відкритих дверцятах верстата. Ще одним вагомим фізичним фактором є підвищений рівень шуму та вібрації. Робота важких металорізальних верстатів, особливо процеси зубофрезерування методом обкатування та високошвидкісне шліфування, призводять до генерації звукових хвиль та перевищення допустимих еквівалентних рівнів шуму, що без належного захисту негативно впливає на слуховий апарат, викликає передчасну втому та виснажує центральну нервову систему робітників.

Специфічним джерелом небезпеки є високий тиск у пневматичній системі спроектованого пристосування. Розроблений механізований пристрій для зубофрезерної операції працює під тиском стисненого повітря у чотири десятих мегапаскаля. Будь-яка раптова розгерметизація гнучких трубопроводів, критичний знос гумовотканинної діафрагми або втомне руйнування з'єднувальних елементів під дією сили затиску, що перевищує десять кілоньютонів, може спричинити пневматичний удар або неконтрольований викид металевої деталі масою понад п'ять кілограмів з базуючої оправки прямо у робочий простір цеху.

Що стосується хімічних шкідливих факторів, то головну роль тут відіграють аерозолі мастильно-охолоджувальних рідин. Виконання більшості лезових та особливо абразивних операцій вимагає інтенсивного, безперервного подання змащувально-охолоджувальної рідини для зниження теплової напруженості інструменту та деталі. Під дією високих температур у

зоні контакту різця чи круга з металом рідина інтенсивно випаровується та розпилюється, утворюючи стійкі дрібнодисперсні аерозолі масляного або синтетичного походження. Ці аерозолі неминуче забруднюють повітря робочої зони та при тривалому вдиханні можуть викликати серйозні професійні захворювання верхніх дихальних шляхів, а при контакті зі шкірою – хронічні професійні дерматити та екземи. Також слід враховувати газові виділення при хіміко-термічній обробці, зокрема при нітроцементациї, коли процес супроводжується насиченням поверхні металу вуглецем і азотом у спеціальних газових середовищах, що призводить до виділення токсичних сполук, які потребують надійної локалізації та видалення. Серед психофізіологічних факторів виділяється нервово-психічне перевантаження, зумовлене високою концентрацією уваги при програмуванні, налагодженні складних систем ЧПК та постійному метрологічному контролю параметрів точності, таких як допуск посадкового отвору за сьомим квалітетом точності або мікронні відхилення профілю зубів. Додається також фізичне перевантаження та монотонність праці, що пов'язані з високим, ритмічним темпом роботи на потоковій лінії та постійними ручними маніпуляціями під час встановлення та зняття заготовок, вага яких на початкових етапах перевищує десять кілограмів.

Забезпечення технічної безпеки при реалізації розробленого технологічного процесу досягається виключно шляхом суворого дотримання конструктивних та експлуатаційних вимог до обладнання й спеціального оснащення. Впроваджені токарні верстати та фрезерні оброблювальні центри мають повне, герметичне кабінетне огороження робочого простору. Конструкція цієї огорожі в обов'язковому порядку оснащена електромеханічними кінцевими вимикачами блокування. При відкритих дверцятах kabіни запуск автоматичного циклу обробки або обертання шпинделя стає технічно та фізично неможливим. На панелях керування кожного без винятку верстата передбачені великі кнопки аварійної зупинки червоного кольору грибоподібної форми для миттєвого знеструмлення всіх

приводів у разі виникнення будь-яких позаштатних ситуацій, поломки інструменту або загрози життю людини. Для запобігання пошкодженню дороговартісного обладнання та травмуванню оператора перед безпосереднім запуском кожної нової керуючої програми здійснюється її обов'язкова віртуальна верифікація та симуляція в системі автоматизованого проектування, що повністю виключає ризик кінематичного зіткнення інструменту з елементами верстата або затискного пристрою.

З точки зору пожежної безпеки, відповідно до чинних державних будівельних норм, за вибухопожежною та пожежною небезпекою проєктована дільниця механічної обробки в цілому належить до категорії Д, оскільки тут відбувається обробка негорючих металевих речовин у холодному стані. Проте наявність специфічних операцій термічної обробки з використанням гартівного масла та широке застосування мастильно-охолоджувальних рідин на основі нафтопродуктів об'єктивно підвищує пожежну небезпеку окремих локальних зон до категорії В. Тому ступінь вогнестійкості несучих конструкцій будівлі дільниці приймається не нижче другого. До основних організаційних та технічних заходів запобігання пожежам належить регулярне, графікове очищення захисних кожухів та піддонів верстатів від масляних відкладень, а також своєчасне видалення сталеної стружки. У зоні інтенсивного різання при дефіциті охолоджуючої рідини стружка може нагріватися до температур, достатніх для самозаймання масляного туману або залишків мастила. Також передбачається регулярна перевірка справності електропроводки, недопущення струмового перевантаження силових кабелів приводів верстатів та суворий контроль за відсутністю іскріння в комутаційній апараті. На дільниці вводиться суворе обмеження кількості мастильних матеріалів та горючих рідин, що зберігаються безпосередньо на робочих місцях, причому цей оперативний запас ні за яких обставин не повинен перевищувати розрахункову змінну потребу. Виробнича дільниця повністю комплектується первинними засобами пожежогасіння відповідно до затверджених норм належності. На

визначену площу передбачається встановлення порошкових вогнегасників та вуглекислотних вогнегасників, які є найбільш ефективними та безпечними при гасінні пожеж класу Е, тобто електроустановок, що перебувають під напругою, включаючи електронні стійки числових систем керування. На території ділянки обладнується повноцінний пожежний щит, який укомплектовується ящиком із сухим просіяним піском, азбестовим полотном для швидкої локалізації дрібних осередків займання розлитих масел, а також підключається внутрішній пожежний водопровід із сертифікованими пожежними рукавами та стволами. На добре помітних, освітлених місцях уздовж шляхів евакуації розміщуються затверджені плани евакуації персоналу та стандартизовані люмінесцентні знаки пожежної безпеки.

ВИСНОВОК

У результаті виконання бакалаврської дипломної роботи було успішно вирішено комплексне інженерне завдання, а саме розроблено технологічний процес виготовлення деталі «Зубчасте колесо» із конструкційної легованої сталі 40Х для умов великосерійного виробництва із заданою річною програмою 5000 штук. На основі проведених розрахунків сформовано низку обґрунтованих технологічних, конструкторських та організаційно-економічних рішень.

У технологічній частині шляхом техніко-економічного порівняння доведено, що гаряче об'ємне штампування на кривошипному гарячештампувальному пресі є економічно вигіднішим за використання горизонтально-кувальної машини. Цей метод забезпечив вищий коефіцієнт використання матеріалу, що склав 0,222 проти 0,18, та відповідне зменшення собівартості заготовки. Спроековано оптимальний технологічний маршрут із застосуванням сучасного високопродуктивного обладнання, зокрема токарних та зубофрезерних верстатів із числовим програмним керуванням. За допомогою системи автоматизованого проектування Siemens NX розроблено керуючі програми, що гарантують оптимізацію траєкторій руху інструменту та безпомилкову механічну обробку.

У конструкторській частині для зубофрезерної операції розроблено спеціальне верстатне пристосування з пневматичним приводом, розрахунки якого підтвердили забезпечення необхідного зусилля затиску у 10348 Н. За допомогою методу скінченних елементів у модулі CAE системи Siemens NX проведено розрахунок напружено-деформованого стану деталі. Аналіз показав, що максимальні еквівалентні напруження за Мізесом у зонах концентрації становлять лише 6,526 МПа. Це свідчить про високий запас міцності конструкції та її надійність під час експлуатації. Додатково було

запропоновано контрольне пристосування для точної перевірки профілю зубів.

Вирішення організаційних питань підтвердило доцільність впровадження багатосерійного виробництва зі змінно-поточною формою. Розраховано необхідну кількість технологічного обладнання, згідно з чим потокова лінія складатиметься з одинадцяти робочих місць, що забезпечить безперервність, прямоточність та ритмічність випуску виробів.

Техніко-економічні розрахунки беззаперечно довели доцільність модернізації оснащення. Завдяки значному скороченню допоміжного часу витрати на заробітну плату робітника на одну деталь знизилися з 15,53 грн до 9,45 грн, а загальна технологічна собівартість операції зменшилася з 55,67 грн до 34,98 грн. Сумарний річний економічний ефект від впровадження пневматичного пристосування становить 103450 грн. Оскільки розрахункова критична програма випуску дорівнює 21,01 шт., що багаторазово перебивається фактичною програмою у 5000 деталей, проект визнається високорентабельним.

Для забезпечення безпечних умов праці розроблено вичерпний комплекс інженерно-технічних та санітарних заходів, спрямованих на нейтралізацію небезпечних факторів. Передбачено використання захисних кабінетних огорожень з кінцевими вимикачами, сучасних засобів пожежогасіння, систем місцевої вентиляції для захисту від аерозолів мастильно-охолоджувальних рідин та надійних контурів заземлення обладнання.

Бакалаврська дипломна робота виконана в повному обсязі. Запропоновані інженерні рішення відповідають сучасному рівню розвитку технології машинобудування, є технічно обґрунтованими, економічно вигідними та цілком готовими до впровадження у реальне виробництво.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1 https://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=32
- 2 Плєскач В.М., Акімов І.В., Мітяєв О.А. Технологічні методи виробництва заготовок деталей машин: Підручник / за заг. ред. доц. В. М. Плєскача. Запоріжжя: Просвіта, 2013. – 372 с.
- 3 Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисциплін з технологічних методів виробництва заготовок для студентів спеціальностей: 131 «Прикладна механіка», 132 «Матеріалознавство», 133 «Галузеве машинобудування», 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка» денної форми навчання / уклад. В. М. Плєскач, В. О. Савченко, І. В. Акімов, Ф. В. Гаврил-Оглу. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2020. 38 с.
- 4 Добрянський, С. С. Технологічні основи машинобудування: підручник для студентів 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.
- 5 Мельничук П.П., Боровик А.І., Лінчевський П.А., Петраков Ю.В. Технологія машинобудування. Житомир: ЖДТУ, 2005. 882 с.
- 6 Основи технології машинобудування. Навчальний посібник. / Ципак В.І. та ін. – Запоріжжя : ЗНТУ, АТ «Мотор Січ», 2003. 335 с.
- 7 Основи теорії різання матеріалів: підручник для вищих навчальних закладів. / Мазур М. П. та ін. за ред. М.П. Мазура. Львів: Новий Світ. 2000. 422 с.
- 8 Паливода Ю. Є., Дячун А. Є., Лещук Р. Я. Інструментальні матеріали, режими різання, технічне нормування механічної обробки: навчально-методичний посібник. Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя. 2019. 240 с.
- 9 Загальномашинобудівні нормативи часу і режимів різання для нормування робіт, виконуваних на універсальних і багатоцільових верстатах з ЧПК. М.: Економіка. 1990 р. 474 с

10 Методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисципліни «Технологічна оснастка» для студентів зі спеціальностей: 131 «Прикладна механіка» освітня програма «Технології машинобудування» 133 «Галузеве машинобудування» освітня програма «Металорізальні верстати та системи» усіх форм навчання / НУ «Запорізька політехніка». Каф. Технологія машинобудування; уклад. Е.В. Вишнепольський, О.Б. Козлова. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024. 82 с.

11 Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Технологічна оснастка» для студентів зі спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньої програми «Технології машинобудування» усіх форм навчання / НУ «Запорізька політехніка». Каф. Технологія машинобудування; уклад. Е.В. Вишнепольський, О.Б. Козлова. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024. 45 с.

12 Методичні рекомендації для дипломного проектування “Оцінка економічної ефективності технічних рішень” для студентів зі спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньої програми «Технології машинобудування» усіх форм навчання / НУ «Запорізька політехніка». Каф. Технологія машинобудування; уклад. Г.В. Пухальська - Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2023. 43 с.

ДОДАТОК А ТЕХНОЛОГІЧНІ КАРТИ