

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет  
«Дніпровська політехніка»

Механіко-машинобудівний факультет  
Кафедра технологій машинобудування та матеріалознавства

*до записки*

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**  
кваліфікаційної роботи ступеня магістра

Здобувача вищої освіти Андреевої Вікторії Дмитрівни  
(ПІБ)

академічної групи 131М-23ЗН-1 ММФ  
(шифр)

спеціальності 131 Прикладна механіка

за освітньо-науковою програмою «Наскрізний інжиніринг  
машинобудівного виробництва»

на тему: «Аналіз і корекція конструкції деталі «Вал-шестерня» за рахунок  
комірчастої структури виготовленої методом 3D друку та подальшої механічної  
обробки»

Наказ ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 28.04.25 №317-с

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	Алексеевко С.В.	89	добре	
розділів:				
Аналітичний	Алексеевко С.В.	89	добре	
Технологічний	Алексеевко С.В.	89	добре	
Спеціальний	Алексеевко С.В.	89	добре	
Науково- дослідницький	Алексеевко С.В.	89	добре	
Рецензент	Сазанішвілі З.В.	89	добре	
		89	добре	

Встановлено, що матеріали даної кваліфікаційної роботи містять чутливу інформацію щодо реальних об'єктів критичної інфраструктури України, національної безпеки і оборони України, зокрема відомості про їх місце розташування, службове призначення, конструкторську і технологічну документацію, описи конструкторських матеріалів та їх властивості, іншу додаткову літературу та посилання. У зв'язку з чим такі матеріали не підлягають відкритому оприлюдненню та мають зберігатися відповідно до встановленого режиму закладом освіти.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

**ЗАТВЕРДЖЕНО:**  
завідувач кафедри

технологій машинобудування та матеріалознавства

(повна назва)

  
(підпис)

В.А. Дербоба  
(ініціали та прізвище)

« 15 » січня 2025 року

## ЗАВДАННЯ на кваліфікаційну роботу ступеня магістра

здобувачу вищої освіти Андрєєвій Вікторії Дмитрівні  
(прізвище та ініціали)

академічної групи 131м-23зн-1 ММФ  
(шифр)

спеціальності 131 Прикладна механіка  
спеціалізації за освітньо-науковою програмою «Наскрізний інжиніринг  
машинобудівного виробництва»

### 1 ПІДСТАВИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ

Наказ ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 28.04.25 №317-с

### 2 МЕТА ТА ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБІТ

Об'єкт досліджень – процес створення полегшеної модифікованої деталі  
методом зменшення об'єму деталі за рахунок комірчастої структури.

Предмет досліджень – принцип створення полегшеної модифікованої  
деталі.

Мета – створення полегшеної модифікованої деталі.

Вихідні дані для проведення роботи – 1) конструкторська документація на  
деталь "Вал-шестерня"; 2) умови виготовлення: дрібносерійне виробництво з  
річною програмою 2000 штук на рік, використання обладнання з ЧПК для  
механічної обробки, застосування сучасного CAD/CAM-програмного  
забезпечення; 3) зменшення маси деталі шляхом розробки заготовки з  
інтегрованою комірчастою структурою з використанням адитивних технологій,  
із забезпеченням збереження експлуатаційних характеристик виробу.

### 3 ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Новизна – створення принципу модифікації типових деталей для

зменшення об'єму виробу на  $\approx 30\%$ .

Практична цінність – рекомендується застосовувати для об'єкта маси та об'єму деталей виготовляємих технологіями адитивного виробництва.

#### 4 ВИМОГИ ДО РЕЗУЛЬТАТІВ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Розробити конструкцію заготовки деталі "Вал-шестерня" з інтегрованою комірчастою структурою, яка забезпечує зменшення маси не менше ніж на 20% без втрати функціональних і міцнісних характеристик.

#### 5 ЕТАПИ ВИКОНАННЯ РОБІТ

Найменування етапів робіт	Строки виконання робіт (початок-кінець)
Аналітичний розділ	29.01.2025-25.02.2025
Технологічний розділ	26.02.2025-24.03.2025
Спеціальний розділ	25.03.2025-21.04.2025
Науково-дослідницький розділ	22.04.2025-19.05.2025


Завдання видано

  
(підпис керівника)

С.В. Алексеенко  
(ініціали та прізвище)

Дата видачі 15 січня 2025 р.

Дата подання до екзаменаційної комісії 9 травня 2025 р.

Прийнято до виконання   
(підпис здобувача вищої освіти)

В.Д. Андреева  
(ініціали та прізвище)

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 Аналітичний розділ .....	6
1.1 Огляд конструкторських і технологічних особливостей деталі .....	6
1.2 Матеріал деталі та його властивості.....	8
1.3 Технологічність конструкції деталі .....	9
1.4 Планування річної виробничої програми.....	11
1.5 Оцінка конструктивних особливостей деталі .....	12
2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ .....	14
2.1 Обґрунтування форми та розмірів заготовки.....	14
2.2 Вибір методів обробки поверхонь .....	15
2.3 Обґрунтування технологічного маршруту виготовлення деталі .....	16
2.4 Розрахунок припусків на механічну обробку .....	17
2.5 Обґрунтування вибраного обладнання.....	18
3 СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ.....	24
3.1 Підбір аналогу матеріалу для адитивного виробництва .....	24
3.2 Підбір технології адитивного виробництва .....	25
3.3 Обґрунтування параметрів та стратегії сканування .....	27
3.4 Підбір машини для адитивного виробництва .....	30
4 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ.....	33
4.1 Виявлення актуальності завдання .....	33
4.2 Проектування модифікованої деталі .....	35
ВИСНОВКИ .....	49
Література.....	51
Додаток А .....	54
Технологічна документація .....	54
Додаток Б.....	59
Кресленик деталі «Шліцьовий вал» .....	59
Додаток В.....	60
Графічний матеріал «Технологічні налаштування».....	60
Додаток Г .....	61
Графічний матеріал до спеціального розділу .....	61
Додаток Д .....	62
Графічний матеріал до науково-дослідницького розділу .....	62
Відомість документів кваліфікаційної роботи .....	63
Відгук керівника кваліфікаційної роботи .....	64

## Реферат

Пояснювальна записка: с, \_\_\_ рис, \_ табл., \_\_\_\_\_ додаток, \_\_ джерела.

Тема: Аналіз і корекція конструкції деталі «Вал-шестерня» за рахунок комірчастої структури виготовленої методом 3D друку та подальшої механічної обробки.

ТЕХНОЛОГІЯ, ДЕТАЛЬ, ТОЧІННЯ, ФОРМОУТВОРЕННЯ, ЧПК, CAD, CAM, SLM, ВАЛ, CNC, КОМІРЧАСТА СТРУКТУРА.

В сучасному машинобудуванні точіння та фрезерування деталей типу "Вал" на верстатах з ЧПК перетворилися на невід'ємний елемент багатьох виробничих процесів. Цей факт робить визначення оптимальної технології та траєкторії обробки надзвичайно актуальним завданням, адже саме від них залежить продуктивність, точність та якість кінцевого виробу.

Об'єкт дослідження (розробки) у кваліфікаційній роботі – процес створення полегшеної модифікованої деталі методом зменшення об'єму деталі за рахунок комірчастої структури.

Предмет дослідження – принцип створення полегшеної модифікованої деталі.

Метою кваліфікаційної роботи є створення полегшеної модифікованої деталі.

Методика досліджень – створення та реалізація принципу інтеграції комірчастої структури для полегшення деталей у програмі nTop.

Результат роботи – згенеровано модифіковану деталь за рахунок інтеграції комірчастої структури. Аналіз даних показує на  $\approx 30\%$  зменшення об'єму та маси модифікованої деталі.

Наукова новизна кваліфікаційної роботи – створення принципу модифікації типових деталей для зменшення об'єму виробу на  $\approx 30\%$ .

Практична цінність – рекомендується застосовувати для облегшення маси та об'єму деталей виготовляємих технологіями адитивного виробництва.

В даній кваліфікаційній роботі проведено всебічний аналіз та чітко окреслено вимоги до точності розмірів, форми, взаємного розташування та шорсткості поверхонь деталі. Запропоновано оптимальний метод отримання заготовки, розроблено детальні технологічні операції обробки. Здійснено обґрунтований вибір металорізального верстата та мірильного пристрою, які відповідають поставленим завданням.

У технологічному розділі представлено інноваційну технологію, що базується на новітній структурі технологічної системи. За допомогою сучасної САПР-системи FeatureCAM виконано комп'ютерне моделювання обробки деталі "Вал-шестерня" на сучасному токарно-фрезерному верстаті з ЧПК.

У науково-дослідному розділі описується розробка модифікованої заготовки. Завдяки застосуванню технології адаптивного виробництва з'являється можливість виготовляти та інтегрувати в деталь комірчасту структуру. Аналіз модифікованої деталі свідчить про значне зменшення

об'єму деталі з  $\approx 50\,908\text{мм}^3$  до  $\approx 35\,865\text{мм}^3$ , що у свою чергу, призведе до зменшення маси на  $\approx 30\%$  як самої деталі так і кінцевого виробу. Впровадження комірчастої структури дозволяє суттєво зменшити витрати матеріалів завдяки зниженню об'єму та маси деталі, що особливо актуально для адитивного виробництва. Скорочує час обробки на верстатах з ЧПК, що призводить до зменшення витрат на електроенергію та амортизацію обладнання. Економічна вигода проявляється у зниженні собівартості виробництва деталей на 15–20% (залежно від типу деталі та обсягу виробництва), а також у підвищенні конкурентоспроможності продукції за рахунок оптимізації її характеристик.

Робота пов'язана з науковим напрямом кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства та виконана відповідно договору про співпрацю та договором про нерозголошення конфіденційної інформації та комерційної таємниці з ТОВ «Машінтех».

## ВСТУП

Технологія машинобудування відіграє ключову роль у дослідженні та вдосконаленні методів створення промислової продукції, яка відповідає встановленим стандартам якості та обсягам виробництва. Сучасний розвиток цієї галузі спрямований на підвищення ефективності обробки матеріалів, модернізацію обладнання, розробку інноваційних інструментів для обробки й вимірювання, а також впровадження технологій 3D друку заготовок. Останнє відкриває нові можливості для виготовлення деталей складної геометрії з високою точністю, що сприяє оптимізації виробничих процесів. Такі зміни зумовлені ускладненням конструкцій виробів, жорсткими вимогами до якості та потребою швидко адаптуватися до змін у виробничих завданнях.

Одним із визначних досягнень у цій сфері є впровадження верстатів із числовим програмним керуванням (ЧПК), оснащених багатоінструментальними системами та засобами автоматизації. Такі верстати дозволяють оптимізувати послідовність технологічних операцій, зменшувати трудовитрати та скорочувати час підготовки виробництва. Це особливо важливо в умовах частотої зміни номенклатури продукції, коли гнучкість і швидкість реагування стають вирішальними факторами.

Попри ці вдосконалення, деякі існуючі технологічні процеси все ще не відповідають сучасним стандартам продуктивності та ефективності. Для підвищення конкурентоспроможності механічних цехів необхідно впроваджувати прогресивні методи обробки, високоефективне обладнання, міцні ріжучі інструменти з твердосплавними вставками, автоматизовані системи, а також технології 3D друку. Таке поєднання дозволяє не лише підвищити якість продукції, а й оптимізувати витрати часу та ресурсів.

Розробка технологічного процесу ґрунтується на аналізі робочих креслень деталей, складальних схем виробів і технічних вимог до виробництва. Вибір оптимального варіанту технологічного процесу вимагає ретельного аналізу економічної доцільності та порівняння альтернативних

рішень з урахуванням обсягів випуску, наявних можливостей підприємства та особливостей проектування.

Запропонований у роботі підхід передбачає інтегроване використання традиційних методів обробки та новітніх технологій. Зокрема, акцент робиться на застосуванні технологій 3D друку для створення заготовок складної форми, що зменшує потребу у великій кількості спеціалізованого обладнання. Водночас використовується обмежена кількість автоматизованих металорізальних верстатів, універсальних пристосувань і сучасних інструментів із твердосплавними пластинами. Застосування як вітчизняного, так і іноземного обладнання забезпечує баланс між доступністю, ефективністю та якістю, що є важливим для серійного виробництва.

Інформаційною основою для розробки слугують технологічні класифікатори, стандарти Єдиної системи технологічної документації, типові технологічні процеси, каталоги обладнання, а також нормативи витрат матеріалів і праці. Для досягнення поставлених цілей рекомендується провести патентно-інформаційний пошук нових технічних рішень у сфері обробки деталей і виготовлення оснащення, а також застосувати аналітичні або експериментальні методи для визначення оптимальних режимів роботи обладнання. Крім того, пропонується провести техніко-економічний аналіз доцільності створення спеціалізованої ділянки в механічному цеху, що буде детально розглянуто у відповідних розділах роботи.

Таким чином, поєднання традиційних і сучасних підходів, зокрема використання технологій 3D друку та автоматизованих систем, дозволяє створити гнучкий і ефективний технологічний процес, який відповідає вимогам сучасного машинобудування.

## 1 Аналітичний розділ

### 1.1 Огляд конструкторських і технологічних особливостей деталі

З  
е  
в  
е  
Е  
Д  
У  
М

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

ступінчастими діаметрами що поступово збільшуються або зменшуються

В  
Д  
К  
Н  
О  
М  
Ч  
В  
Ч

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

згинальних моментів і осьових навантажень.

За призначенням вали поділяються на вали передач і корінні вали машин. Вали передач слугують для монтажу зубчастих коліс, шківів, муфт та інших компонентів передачі, тоді як корінні вали, крім передачі руху, використовуються для встановлення маховиків, кривошипів чи затискних

патронів. Залежно від форми осі вали бувають прямими, ексцентриковими (колінчастими, кулачковими), гнучкими або карданними, а за конструкцією — гладкими, ступінчастими чи порожнистими.

Перед початком механічної обробки валу необхідно визначити єдину базу, що забезпечить точність на всіх етапах обробки. Така база зазвичай формується торцевими поверхнями центральних отворів, від точності яких залежить якість подальших операцій. Особливо важливим завданням під час обробки шліцевих валів є вирівнювання осей усіх ступенів у єдину геометричну лінію, що мінімізує ризик невідповідності вимірюванням.

(  
E  
E  
I  
E  
J  
2  
E

**Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.**

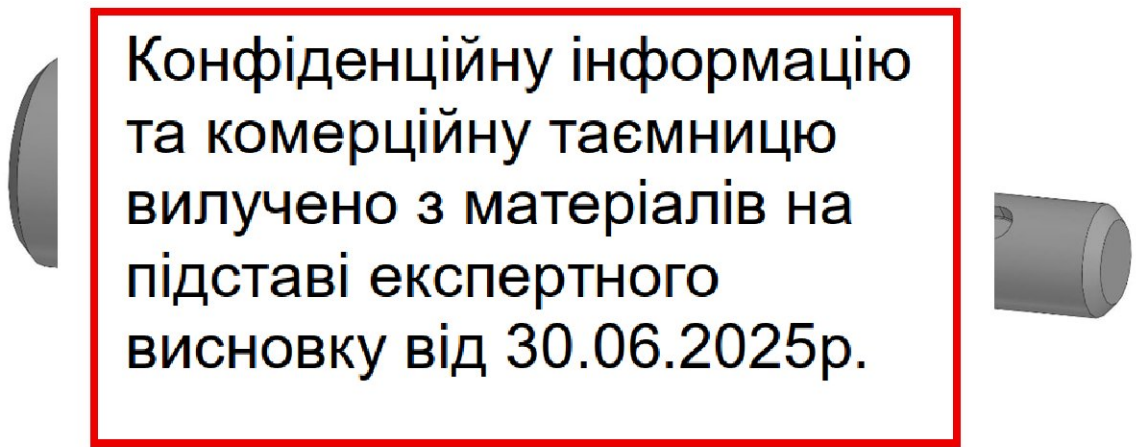


Рисунок 1 – “Вал-шестерня” 3D модель

## 1.2 Матеріал деталі та його властивості

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Лімічний склад і механічні властивості цього матеріалу представлені у таблицях 1.1 та 1.2.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Сірка (S)	$\leq 0.01$
Алюміній (Al)	0.05–0.15

Елемент	Вміст (%)
Хром (Cr)	≤0.5
Мідь (Cu)	≤0.5

Меж
Меж
Від
Від
Уда
Тве

**Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.**


Завдяки своїм властивостям сталі 17-0CrNi20-2 дозволяють підходити для виробництва високонавантажених деталей, таких як «Вал-шестерня». Використання 3D-друку з подальшою механічною обробкою дозволяє досягти точності форми, а висока міцність і стійкість до втоми гарантують надійність і тривалий термін служби деталі в умовах інтенсивного використання.

### 1.3 Технологічність конструкції деталі

Аналіз конструкторського креслення деталі «Вал-шестерня» свідчить про його повну інформативність: усі розрізи та виносні елементи чітко визначають геометрію, матеріал, масу та вимоги до термообробки. Поверхні деталі легко доступні для механічної обробки та технічного обслуговування, що виключає потребу в спеціалізованих методах чи обладнанні. Використання універсальних верстатів та інструментів є оптимальним, оскільки забезпечує відповідність заданим параметрам точності й

шорсткості. Відсутність ускладнень із доступом інструменту до оброблюваних зон підтверджує високу технологічність конструкції за всіма

**Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.**

під час механічної обробки, що, у свою чергу, гарантує правильну роботу деталі в складі механізму.

Обраний матеріал є придатним для механічної обробки, зварювання та термообробки, а його механічні властивості відповідають умовам експлуатації деталі. Це дозволяє забезпечити довговічність і надійність валу-

**Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.**

автоматичних лініях, що відкриває можливості для автоматизації виробництва. Це не лише підвищує точність і повторюваність, а й знижує

вплив людського фактора, що є ключовим для забезпечення стабільної якості продукції.

Таким чином, конструкція деталі «Вал-шестерня» є технологічно ефективною, що підтверджується простотою геометрії, раціональним вибором матеріалу, можливістю мінімізувати переналагодження та використовувати стандартне обладнання. Це робить її оптимальною для серійного та дрібносерійного виробництва, де важливо поєднувати високу якість із економічною доцільністю.

#### 1.4 Планування річної виробничої програми

Річна потреба у деталях «Вал-шестерня» розраховується з урахуванням випуску виробів та резерву запасних частин за формулою::

$$N = N_{\text{в}} \cdot q \cdot \left(1 + \frac{h}{100}\right), \quad (\text{шт./рік}) \quad (1)$$

де  $N_{\text{в}}$  – річна програма випуску виробів;

$q$  – кількість деталей даного найменування в одному виробі;

$h$  – відсоток деталей, призначених на запасні частини (від 1 % до 3 %).

$$N = 2000 \cdot 1 \cdot \left(1 + \frac{1}{100}\right) \approx 2020 \text{ шт./рік}$$

Ключовим комплексним критерієм при проектуванні та аналізі технологічного процесу є класифікаційна категорія, відома як тип виробництва. Попереднє визначення типу виробництва базується на взаємозв'язку між річною програмою випуску деталі та її масою (приблизно), враховуючи такт випуску деталей. Це визначення далі уточнюється за коефіцієнтом закріплення операцій, який є найточнішим критерієм, але може

бути визначений лише при постійному виробництві протягом місячного календарного періоду. У даному випадку цей критерій не розраховується і апріорі приймається дрібно серійний тип виробництва.

Основним показником, що характеризує дрібне виробництво, є обсяг випуску деталей, який запускається періодично (виріб випускається серіями, що складаються з конкретних деталей). Обсяг партії визначається за відповідною формулою:

$$n = \frac{N \cdot a}{\Phi}, \quad (2)$$

де  $a$  – періодичність запуску деталей у виробництво, днів. Можливі значення – від 3 до 24. Іноді цей параметр називають запасом деталей на складі складального цеху;

$\Phi$  – кількість робочих днів за рік відповідно до законодавства.

$$n = \frac{202 \cdot 10}{250} \approx 8 \text{ шт.}$$

### 1.5 Оцінка конструктивних особливостей деталі

прост  
потре  
важк  
оптим  
спеці  
ЧПК  
провс

**Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.**

ться  
о не  
без  
кція  
чи  
так і  
ння  
при

цьому технологічні бази збігаються з конструкторськими та вимірювальними. Деталь є жорсткою, оскільки співвідношення довжини до діаметру становить:

$$L/D = 120/41 \approx 2,9 < 12,$$

що забезпечує надійне кріплення та базування під час механічної обробки.

Деталь технологічно доведена технологічно

**Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.**

ність і ерацій таль є

## 2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Обґрунтування форми та розмірів заготовки

К  
Н  
Р  
П  
Р  
П  
О

**Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.**

я в обмеженій  
матеріалу сталь  
ідсутністю на  
матеріалу, які б  
ї оптимальним  
владнання для  
її механічної  
лічний процес.

Довжина заготовки розраховується з урахуванням загальної довжини деталі, враховуючи припуск на кожну із сторін. Найбільший діаметр заготовки дорівнює 41 мм і має загальні дпуски за креслеником. З огляду на несиметричне розташування ступеня вала найбільшого діаметра по

В

С  
Д  
З

**Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.**

рячекатаний  
прокатки Б.  
вох торців –

Г  
Н  
В  
П

ї сталний  
иходячи, що  
я значення,  
іє дає малі

Довжина заготовки з прокату визначається із загальної довжини деталі. Загальна довжина деталі становить 120 мм, додаємо по 1,5 мм на кожну із сторін. Таким чином враховується похибки на відрізання заготовки, а також

припуск на подальшу обробку торців.

Отже, обраний прокат з підвищеною точністю Б і діаметром 42 мм. Виходячи, що на деталі максимальний діаметр 41 мм, призначаються за ДСТУ 4738:2007 відхилення на розмір  $\varnothing 42_{-0,7}^{+0,2}$  мм.

Заготовкою для «Вал-шестерня» призначається прокат и записується умовне позначення:

K<sub>1</sub>

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Заготовка має довжину 120 мм з полем допуску по  $h14/2$  і діаметр з відхиленнями  $42_{-0,7}^{+0,2}$  мм.

## 2.2 Вибір методів обробки поверхонь

Вибір методів обробки поверхонь деталі «Вал-шестерня» залежить від типу заготовки та її початкової точності. Кількість операцій і їх послідовність формуються з урахуванням методів обробки, які підбираються відповідно до

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

вимог шорсткості та особливостей роботи зі сталлю поверхні, їх розміри та способи обробки, що технічним вимогам креслення, представлені в

Таблиця 2.1 – Методи одержання поверхонь

Вид операційних, розмір, мм	Квалітет	Ra, мкм	Метод обробки поверхонь
Зовнішній $\varnothing 22_{+0,002}^{+0,015}$	6	1,6	Точіння чорнове Точіння чистове

Вид операційних, розмір, мм	Квалітет	Ra, мкм	Метод обробки поверхонь
			Тонке точіння
Зовнішній $\varnothing 12^{+0,025}_{+0,007}$	7	2,5	Точіння чорнове Точіння чистове Тонке точіння
$\varnothing 28_{-0,21}$ , $\varnothing 16_{-0,18}$ ,	12	6,3	Точіння чорнове Точіння чистове
Паз $10^{+0,022}$	8	6,3	Фрезерування
Евольвентна поверхня $\varnothing 41$		6,3	Точіння чорнове Точіння чистове Фрезерування

### 2.3 Обґрунтування технологічного маршруту виготовлення деталі

Сучасний світ активно працює над автоматизацією у всіх можливих сферах з метою ефективного використання часу під час виробництва. Концентрація всіх операцій з виготовлення деталі на одному верстаті з мінімальною кількістю переустановок.

Тенденції автоматизації виробництва спрямовані на раціональне використання часу та зростання продуктивності. Виконання всіх операцій на одному верстаті з мінімальною кількістю переустановок відіграє важливу роль у дрібносерійному виробництві. Для деталі «Вал-шестерня» застосовується токарно-фрезерний верстат з ЧПК, який забезпечує підготовку технологічних баз, чорнове та чистове точіння поверхонь, а також фрезерування шпонкового пазу за допомогою осі В. Для досягнення необхідної точності замість шліфування використовується тонке точіння. Завершальним етапом є контрольна операція, під час якої перевіряються розміри поверхонь та їх взаємне розташування. Технологічний маршрут детально описано в таблиці

2.2.

Таблиця 2.2 – Маршрут обробки деталі

№ оп.	Найменування операцій	...	Модель
05	Програмна (токарно-фрезерна)	Пс то фр	і30
10	Контрольна	Кс	і30

**Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.**

#### 2.4 Розрахунок припусків на механічну обробку

Припуски на механічну обробку суттєво впливають на собівартість виготовлення деталі. Збільшення припуску може подовжити машинний час через потребу в додаткових проходах або зниження режимів різання при значній глибині, що підвищує витрати на інструмент і загальні експлуатаційні витрати. У цьому випадку розрахунок міжопераційних припусків проведено для деталі з діаметром  $\varnothing 22^{+0,015}_{+0,002}$  мм, для якого передбачено три етапи: чорнове точіння, чистове точіння та тонке точіння. Загальний припуск на чорнове точіння становить 17,281 мм і розподілений на 5 проходів по 3,4562 мм кожен. Усі обчислення детально викладено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Розрахунок припусків до зовнішньої поверхні  $\varnothing 22^{+0,015}_{+0,002}$  з  $\varnothing 42^{+0,2}_{-0,7}$  мм.

Стадії	Припуск,	Розрахун-	Допуск,	Розмір, мм	Припуск, мм
--------	----------	-----------	---------	------------	-------------

обробки	мм	ковий розмір, мм	МКМ	$d_{min}$	$d_{max}$	$Z_{min}$	$Z_{max}$
Заготовка		41,75	900	41,3	42,2		
Токарна чорнова	3,4562	23,769	250	23,769	24,019	3,4562	3,6862
Токарна чистова	1,2	70,562	54	22,515	22,569	1,2	1,504
Тонке точіння	0,5	70,043	13	22,002	22,015	0,5	0,567

## 2.5 Обґрунтування вибраного обладнання

Застосування токарно-фрезерного верстата з ЧПК KOVOSVIT MAS MULTICUT 630/1500 з осями В і С гарантує автоматизацію, високу продуктивність і скорочення часу на переналагодження. Завдяки наявності фрезерної осі В усі операції, включно з обробкою шпонкового пазу, виконуються на одному верстаті. Контроль якості поверхонь забезпечується щупом RENISAW. Технічні характеристики обладнання наведено в таблиці 2.4.

Операція 05 Програмна.

Установ 1.

Заготовка базується в 3-х кулачковому патроні. На цій операції оброблюється з однієї сторони канавка та посадочне місце  $\varnothing 22^{+0,015}_{+0,002}$ , обробка зубчатої поверхні.

Установ 2.

Заготовка базується в 3-х кулачковому патроні з піджимом центру. На цій операції оброблюється з іншої сторони канавка та посадочне місце  $\varnothing 22^{+0,015}_{+0,002}$ , фрезерується паз.

Операція 10 Програмна.

Не знімаючи деталь з верстату, після обробки, виконується контроль оброблених поверхонь.



Рисунок 2 – Токарно-фрезерний верстат з ЧПК KOVOSVIT MAS MULTICUT 630/1500

Таблиця 2.4 – Основні характеристики верстату MULTICUT 630 / 1500

Опис характеристики	Вимір	Значення
Геометрична та робоча точність		ISO 13041
Оборотній $\varnothing$ над станиною / над нижнім супортом	мм	1 150 / 1 020
Макс. $\varnothing$ токарної обробки ( $V=90^\circ$ / $V=60^\circ$ / $V=45^\circ$ / $V=0^\circ$ )	мм	790 / 930 / 1 060 / 1 150
Макс. довжина точіння	мм	1 600
Максимальна відстань між торцем шпинделя і торцем пінолі задньої бабки	мм	1 900
Макс. вага деталі – без опори / с задньою бабкою (вкл. зажим при макс. обертах 250 об/хв)	кг	1 000 / 2 500

Опис характеристики		Вимір	Значення
Макс. вага деталі – с задньою бабкою и одним люнетом / с задньою бабкою и двома люнетами (вкл. зажим при макс. обертах 250 об/хв)		кг	3 000 / 3 500 / 4 000
Шпиндель деталі S <sub>1</sub>			Основний токарний шпиндель
Передній кінець шпинделя (DIN 55026)			A11
Макс. ø оброблюваного прутка		мм	122
Потужність шпинделя S1 /(S-100% / S6- 60%)		кВт	41 / 49
Крутний момент шпинделя S1 / S1-100%/ S6 – 60%		Нм	I передача 2 736 / 3283 II передача 547 / 657
Макс. обороти шпинделя		об/хв	2 800
Кількість передач			2
Висота осі шпинделя		мм	1 325
Привод осі C <sub>1</sub>			
Мін. програмований інкремент		°	0,0001
Макс. крутний момент S3-40% / Момент тормоза		Нм	1 792 / 3 000
Макс. оберти шпинделя		об/хв	30
Інструментальний шпиндель S <sub>3</sub>			
Основний шпиндель (Kessler)	Затискний конус інструменту		HSK-T 63 (HSK-T 100, Capto C6, Capto C8)
	Потужність шпинделя S1 / S6-40%	кВт	25 / 30
	Крутний момент шпинделя	Нм	119 / 143

Опис характеристики		Вимір	Значення
	S1 / S6-40%		
	Макс. оберти шпинделя	об/хв	12 000
Універсальний шпиндель (Diplomatic)	Затискний конус інструменту		HSK-T 100, Capto C8
	Потужність шпинделя S1 / S6-40%	кВт	37 / 47
	Крутний момент шпинделя S1 / S6-40%	Нм	140 / 180
	Макс. оберти шпинделя	об/хв	12 000
Силовий шпиндель (Diplomatic)	Затискний конус інструменту		HSK-T 100, Capto C8
	Потужність шпинделя S1 / S6-40%	кВт	29 / 38
	Крутний момент шпинделя S1 / S6-40%	Нм	200 / 255
	Макс. оберти шпинделя	об/хв	6 500
Ось інструментального шпинделя В			
Макс. кут повороту		°	-30 / +210
Крутний момент S1 / S6-40%		Нм	750 / 1 300
Крутний момент із гальмом (аретацією / гальмом)		Нм	8 000 (K) 8 200 / 1 700 (D)
Макс. оберти		об/хв	50
Мін. програмований інкремент		°	0,0001
Осі X <sub>1</sub> , Y <sub>1</sub> , Z <sub>1</sub>			
Швидкісна подача		мм/хв	40 000 / 30 000 / 40 000
Хід		мм	780 / 400 / 1 600
Сила подачі			

Опис характеристики	Вимір	Значення
X <sub>1</sub> , S1 / S3-40%	кН	12 / 17
Y <sub>1</sub> , S1 / S3-40%	кН	14,5 / 20,5
Z <sub>1</sub> , S1 / S3-40%	кН	14,5 / 20,5
Точність повторної установки згідно ČSN ISO 230-2		
X <sub>1</sub> , пряме відмірювання	мм	0,006
Y <sub>1</sub> , пряме відмірювання	мм	0,006
Z <sub>1</sub> , пряме відмірювання	мм	0,008
C <sub>1</sub> , лівий шпindel	°	0,005
Магазин інструмента		
Макс. ø інструмента в кожному осередку / через 1	мм	90 / 175 (HSK-T 63, Capto C6)
Макс. ø інструмента в кожному осередку / через 1	мм	130 / 200 (HSK-T 100, Capto C8)
Макс. довжина інструмента	мм	500
Макс. вага інструмента	кг	12
Час зміни інструменту (інструмент - інструмент)	с	3
Кількість інструментів HSK-T 63, Capto C6	шт.	66 (120, 180 - опція)
Кількість інструментів HSK-T 100, Capto C8	шт.	44 (80, 120 - опція)
Точність повторної установки згідно ČSN ISO 230-2		
X <sub>2</sub> , пряме відмірювання	мм	0,006
Z <sub>2</sub> , пряме відмірювання (опція)	мм	0,008
Люнет без висування (*)		
Тип люнета		К 6 (135-460)

Опис характеристики	Вимір	Значення
		К 6.1 (215-510)
Обмеження обертового $\varnothing$	мм	460 / 510
Люнети с висувним (*)		
Тип люнета		SR 5 (45-310) SR 5.1 (85-350) К 5.1 (100-410)
Обмеження обертового $\varnothing$	мм	630
Максимальна кількість люнетів на верстаті	шт.	3
Спеціальний магазин інструмента для глибокого свердління		
Кількість позицій	шт.	1 – 3
Макс. довжина інструмента включно с зажимом	мм	1 500
Макс. $\varnothing$ інструмента	мм	125
Задня бабка		
Конус		Мо 6
Хід пінолі / діаметр пінолі	мм	180 / 190
Діапазон притискного зусилля	кН	2,5 – 25
Розміри верстату		
Довжина верстата, включаючи транспортер стружки / без транспортера стружки / для транспорту	мм	6 630 / 7 900 / 6 630
Вага верстата	кг	24 000 - 29 500
Кількість одночасно керованих осей при обробці		5
Система управління		SINUMERIK 840 D sl.

### 3 СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

#### 3.1 Підбір аналогу матеріалу для адитивного виробництва

Матері  
мартенситно  
для виготовл  
високою міц  
для відповід  
за технолог  
використову  
порошку, як  
ASTM, і мав

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Аналіз по  
MS1 (Maraging  
спеціально роз  
Схожість між F  
вміст нікелю, к  
таких як висока  
цим властивос  
процесі адитив

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Матеріал I  
міжнародним ст  
забезпечує точн  
специфікація дл  
що гарантує відп

Нижче нав  
властивостями M  
високонавантаже

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Залі	<p><b>Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.</b></p>		
Нік			
Коб			
Мол			
Тит			
Алк			
Хрс			
Мід			
Вуглець (С)	-	0.03	
Маг	<p><b>Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.</b></p>		
Кре			
Фос			
Сір			
Мез			
Мез			
Відносна порожнина, %		100	
Твердість			
Ці	<p><b>Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.</b></p>		ість
деталі «І			AS1
ідеальни			
3.2			

Технологія селективного лазерного плавлення (SLM) рис. 3 зазвичай застосовується для виготовлення складних металевих деталей, коли потрібні висока точність, міцність і можливість створення внутрішніх структур, які важко або неможливо реалізувати традиційними методами обробки. Цей метод ідеально підходить для виробництва компонентів із складною геометрією, таких як деталі з внутрішніми каналами, порожнинами або комірчастими структурами. SLM широко використовується в аерокосмічній, автомобільній та медичній галузях, де важливими є зменшення ваги деталей без втрати їхньої міцності, а також економія матеріалів.

**Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.**

Рисунок 3 – Схема роботи SLM машини

Для деталі «Вал-шестерня» технологія SLM є особливо актуальною через її складну форму, що поєднує шестерню та вал. Використання комірчастої структури всередині валу дозволяє знизити вагу деталі, зберігаючи при цьому її механічні характеристики, що критично важливо для застосувань із високими вимогами до маси. Крім того, SLM забезпечує високу точність виготовлення, що гарантує правильну роботу шестерні та її взаємодію з іншими елементами. Також ця технологія мінімізує відходи

матеріалу, що є економічно вигідним, особливо при роботі з дорогими металевими сплавами.

Принцип роботи SLM полягає в пошаровому формуванні деталі шляхом плавлення металевих порошків лазером. Процес розпочинається з нанесення тонкого шару порошку на робочу платформу. Потім лазер, керований комп'ютерною моделлю, вибірково плавить порошок у тих місцях, які відповідають перерізу деталі на даному шарі. Після завершення плавлення одного шару платформа опускається на задану товщину, наноситься новий шар порошку, і процес повторюється, доки деталь не буде повністю сформована. Після друку деталь часто піддається додатковій обробці, наприклад, термічній, для зняття напружень і покращення властивостей матеріалу.

### **3.3 Обґрунтування параметрів та стратегії сканування**

Для виготовлення деталі «Вал-шестерня» з дисперсного порошку MS1 методом SLM стратегія сканування має бути орієнтована на забезпечення оптимального балансу між якістю деталі, її міцністю та часом виробництва. Оскільки деталь після друку піддаватиметься механічній обробці на верстаті з ЧПК, допускається використання більшого шару порошку для прискорення процесу виготовлення. Це дозволяє зменшити кількість шарів, що наносяться, і, відповідно, скоротити час друку, зберігаючи при цьому достатню якість для подальшої обробки. Таким чином, пріоритетом є економія часу виробництва без значного погіршення структурної цілісності деталі.

Стратегія сканування передбачає використання однорідного розподілу лазерного випромінювання по поверхні шару порошку з урахуванням типу матеріалу MS1 (мартенситностаріюча сталь). Вибір параметрів сканування базується на забезпеченні повного плавлення порошку для створення щільної структури, що є важливим для забезпечення міцності деталі.

Саме Bi-directional Double Pass 90° рис. 4 вибрано як оптимальну стратегію сканування. Цей метод передбачає дворазове сканування кожного шару з поворотом напрямку на 90° між проходами. Такий підхід забезпечує рівномірний розподіл тепла, зменшує ризик деформацій і є особливо ефективним для деталей зі складною геометрією, таких як «Вал-шестерня». Використання дворазового проходу з поворотом також сприяє підвищенню щільності та покращенню механічних властивостей деталі, що критично

**Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.**

вс

Рисунок 4 – Стратегія сканування

Потужність лазера є ключовим параметром, що впливає на глибину плавлення порошку та якість сплавлення. Для MS1 у процесі SLM типова потужність лазера становить від 200 до 300 Вт. Для забезпечення повного плавлення порошку при товщині шару 50 мкм оптимальною є потужність 250 Вт. Це значення дозволяє досягти достатньої щільності деталі, зберігаючи ефективність процесу.

Швидкість сканування визначає час, необхідний для обробки одного шару, а також впливає на якість поверхні. Для MS1 рекомендований діапазон швидкості становить 600-1200 мм/с. Оскільки деталь піддаватиметься механічній обробці, можна обрати вищу швидкість, наприклад, 1000 мм/с, що скоротить час друку без критичного впливу на якість поверхні.

Товщина шару безпосередньо впливає на точність деталі та час її виготовлення. У SLM для MS1 стандартна товщина шару коливається від 20 до 50 мкм. Для економії часу виробництва обрано товщину шару 50 мкм, що зменшує кількість шарів і прискорює процес друку. Такий підхід є виправданим, враховуючи подальшу механічну обробку.

Відстань між лініями сканування (hatch distance) впливає на щільність деталі та швидкість процесу. Для MS1 рекомендована відстань становить 0.1-0.2 мм. Використання значення 0.15 мм забезпечує достатню щільність структури при розумному часі друку.

Час витримки лазера в одній точці (dwell time) становить 30 мкс (діапазон 20–50 мкс). Це забезпечує достатнє плавлення порошку без перегріву матеріалу, сприяючи якісному з'єднанню шарів.

Для визначення оптимальних параметрів можна скористатися емпіричними даними та рекомендаціями з літератури. Енергетична густина лазера (E) розраховується за формулою:

**Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.**

$$E = \frac{250}{1000 \times 0.15 \times 0.05} = \frac{250}{7.5} \approx 33.33 \text{ Дж/мм}^3$$

Ця величина енергетичної густини є достатньою для повного плавлення порошку MS1 і створення щільної структури, що відповідає рекомендаціям літератури [8].

Таким чином, для виготовлення деталі «Вал-шестерня» методом SLM використання стратегії сканування з товщиною шару 50 мкм, що виправдано подальшою механічною обробкою для економії часу виробництва, у поєднанні з обраними параметрами стратегією Bi-directional Double Pass 90° з потужністю лазера 250 Вт, швидкістю сканування 1000 мм/с, відстанню між лініями 0.15 мм та часом витримки 30 мкс, що дозволяє досягти оптимального балансу між якістю виготовленої деталі та ефективністю самого процесу SLM.

### **3.4 Підбір машини для адитивного виробництва**

Для обґрунтування вибору адитивної машини EOS M 280 рис. 5 для виготовлення деталі «Вал-шестерня» проведено аналіз попередніх даних щодо обсягу партій, матеріалу, габаритних розмірів деталі та параметрів процесу друку. Нижче наведено детальний розгляд кожного аспекту, що підтверджує відповідність цієї машини всім виробничим вимогам.

**Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.**

Виробництво деталі «Вал-шестерня» передбачає періодичний запуск партій обсягом 8 штук. Ця кількість є оптимальною для виготовлення за один цикл на адитивній машині, що дозволяє скоротити час на підготовку обладнання та підвищити ефективність процесу. EOS M 280 оснащена робочою камерою розміром 250 x 250 x 325 мм, що забезпечує достатній простір для розміщення 8 деталей одночасно. Така можливість оптимізує використання робочого об'єму та зменшує собівартість виробництва кожної деталі.

Процес друку деталі «Вал-шестерня» вимагає точного дотримання таких параметрів:

- потужність лазера: 250 Вт;
- швидкість сканування: 1000 мм/с;
- товщина шару: 50 мкм;
- відстань між лініями сканування: 0.15 мм.

EOS M 280 оснащена лазером потужністю до 400 Вт, що перевищує необхідний рівень і дозволяє гнучко налаштовувати процес. Швидкість сканування до 7000 мм/с значно перевищує потрібні 1000 мм/с, а товщина шару регулюється в межах 20–100 мкм, що охоплює задане значення 50 мкм. Відстань між лініями сканування також налаштовується відповідно до вимог (0.15 мм), що робить машину ідеальною для виконання цих параметрів.

Адитивна машина EOS M 280 таб. 3.3 повністю відповідає всім критеріям для виробництва деталі «Вал-шестерня»:

- забезпечує розміщення партії з 8 деталей завдяки об'єму робочої камери (250 x 250 x 325 мм);
- підтримує роботу з матеріалом MS1, оптимальним для SLM-технології;
- відповідає габаритним розмірам деталі та дозволяє ефективно використовувати робочий простір;
- гарантує виконання всіх параметрів процесу друку з високою точністю та якістю.

Крім того, EOS M 280 є надійним і поширеним обладнанням у сфері адитивного виробництва, що забезпечує стабільність роботи, доступність сервісу та високу якість кінцевих виробів. Її вибір є економічно виправданим і технологічно обґрунтованим рішенням.

Таблиця 3.3 – Технічні характеристик EOS M 280

<b>Характеристика</b>	<b>Значення</b>
Технологія	Селективне лазерне плавлення (SLM)
Розміри робочої камери	250 x 250 x 325 мм
Потужність лазера	До 400 Вт
Тип лазера	Волоконний лазер
Швидкість сканування	До 7000 мм/с
Товщина шару	20–100 мкм
Розмір фокусу лазера	70–100 мкм
Матеріали	Металеві порошки (сталь, титан, алюміній тощо)
Система управління	EOSYSTEM
Програмне забезпечення	EOSPRINT, EOSTATE
Точність позиціонування	±0.01 мм
Електроживлення	400 В, 50/60 Гц, 32 А
Споживана потужність	Макс. 8.5 кВт
Габарити машини	2500 x 1300 x 2190 мм
Вага	Прибл. 1250 кг

Ця таблиця підтверджує технічну придатність EOS M 280 для виробництва деталі «Вал-шестерня», враховуючи всі аспекти від обсягу партій до параметрів друку.

## **4 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ**

У цьому розділі представлено розробку полегшеної заготовки для деталі "Вал-шестерня" з використанням комірчастих структур. Робота виконується за допомогою технологій адитивного виробництва на машині EOS M 280 у програмному середовищі nTop. Застосування комірчастих структур дозволяє суттєво зменшити вагу деталі зберігаючи її механічні властивості, що відповідає сучасним вимогам до ефективності та економічності виробництва. Такий підхід відкриває нові можливості для оптимізації конструкцій у різних галузях промисловості.

### **4.1 Виявлення актуальності завдання**

Сьогодні технології 3D друку, зокрема адитивне виробництво (AM), переживають справжній прорив, набуваючи нових масштабів у промисловому секторі. Одним із ключових методів AM є селективне лазерне плавлення (SLM), яке використовує дисперсний металевий порошок для створення деталей складної геометрії. Ця технологія активно застосовується у дрібносерійному виробництві, зокрема в медицині, авіабудуванні та космічних програмах, де попит на легкі, міцні та точні компоненти постійно зростає. Наприклад, у 2023 році обсяг ринку адитивного виробництва перевищив 20 мільярдів доларів, і SLM відіграє ключову роль у цьому зростанні завдяки своїй універсальності та ефективності.

Технологія SLM стрімко поширюється завдяки своїй здатності виготовляти деталі швидше та з меншими витратами порівняно з традиційними методами, такими як лиття чи механічна обробка. Для деталі "Вал-шестерня", яка поєднує вал і шестерню, SLM дозволяє створювати складні внутрішні структури, наприклад, комірчасті, що неможливо реалізувати класичними способами без значних затрат часу та ресурсів. Це

робить SLM ідеальним рішенням для виробництва високоточних компонентів у галузях, де кожна хвилина та грам мають значення.

З економічної точки зору, використання SLM має низку вагомих переваг, наприклад мінімізація відходів: На відміну від традиційного виробництва, де значна частина матеріалу втрачається під час обробки, SLM використовує лише необхідну кількість порошку, що особливо вигідно при роботі з дорогими матеріалами, такими як мартенситностаріюча сталь MS1.

Завдяки комірчастим структурам вага деталі, як-от "Вал-шестерня", може бути зменшена на 20–40% без втрати міцності. У галузях, таких як авіація чи космічна промисловість, це призводить до економії палива, зниження експлуатаційних витрат і підвищення конкурентоспроможності виробів. Заміна монолітного матеріалу комірчастими структурами значно полегшує деталь, зберігаючи її функціональність. Для "Вал-шестерні" це означає можливість роботи в умовах високих навантажень при зниженій масі. У безпілотних літальних апаратах (БПЛА) таке полегшення дозволяє збільшити дальність польоту або корисне навантаження, що має стратегічне значення для військових і цивільних застосувань. Наприклад, зменшення маси на 1 кг може підвищити ефективність БПЛА на 5–10%, що є суттєвим аргументом для впровадження SLM.

Однак технологія SLM має свої обмеження, зокрема щодо якості поверхні. Після друку деталь може мати шорсткість, яка не відповідає технічним вимогам, зазначеним у кресленні. Для "Вал-шестерні" це особливо актуально для зубців шестерні та посадкових місць під підшипники. У таких випадках необхідна додаткова пост-обробка, наприклад, механічна обробка на верстатах з ЧПК. При проектуванні заготовки важливо враховувати припуски на обробку, щоб кінцевий виріб відповідав усім стандартам. У даному випадку потрібно врахувати допуск на механічну обробку на поверхнях.

## 4.2 Проектування модифікованої деталі

Завантажується деталь «Вал-шестерня» в nTop в форматі .stl рис. 6.

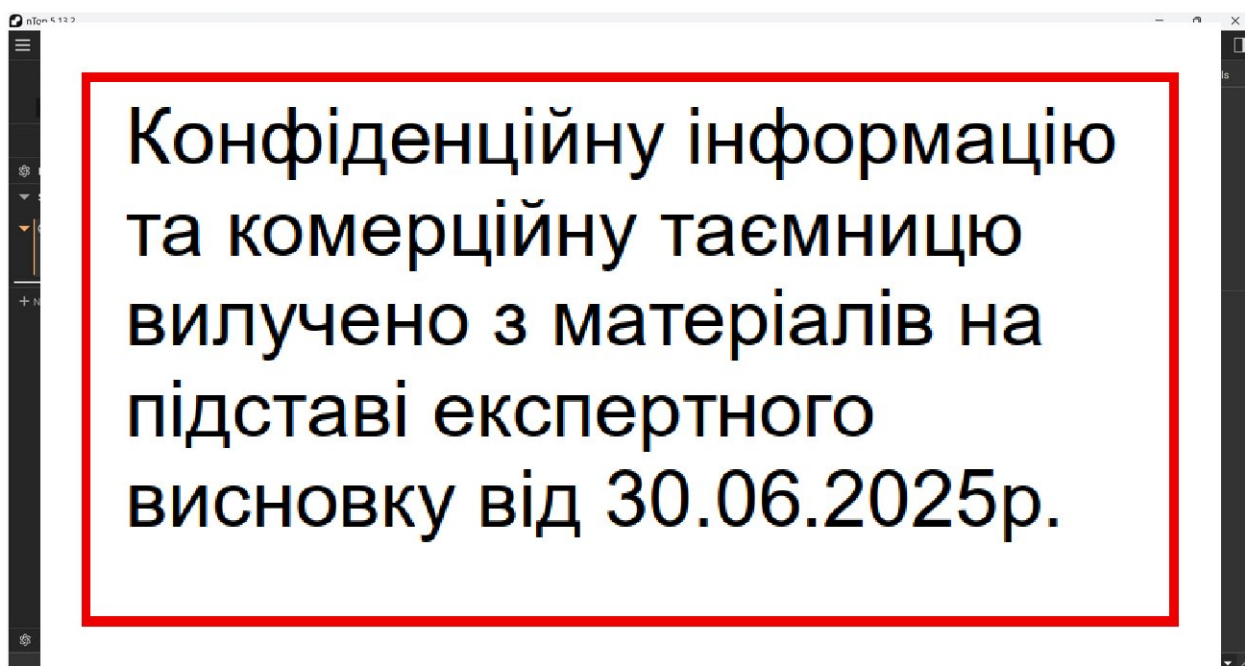


Рисунок 6 – Деталь «Вал-шестерня» в nTop

За допомогою блока Shell створюється пустотілу оболонку в 3 мм по контуру деталі рис. 7.

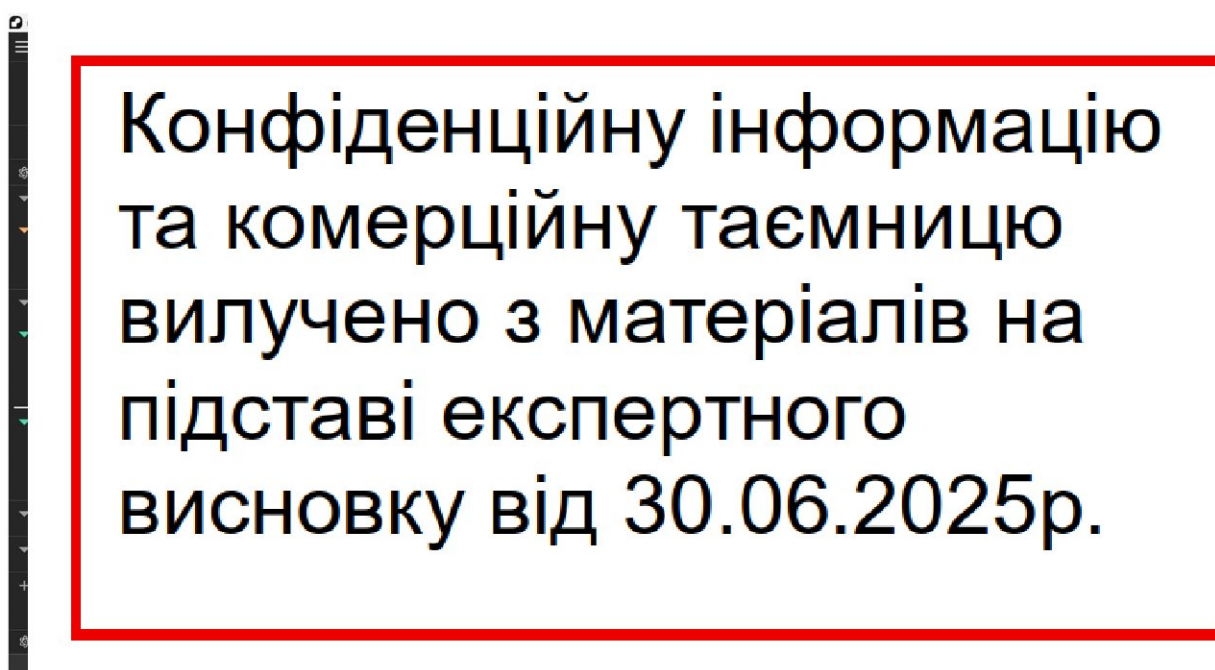


Рисунок 7 – Пустотіла оболонка в 3 мм

За допомогою блока Shell створюється додаткову оболонку в 1,5 мм яка відповідатиме за припуск від центру контуру деталі, тобто припуск 0,75 мм рис. 8.

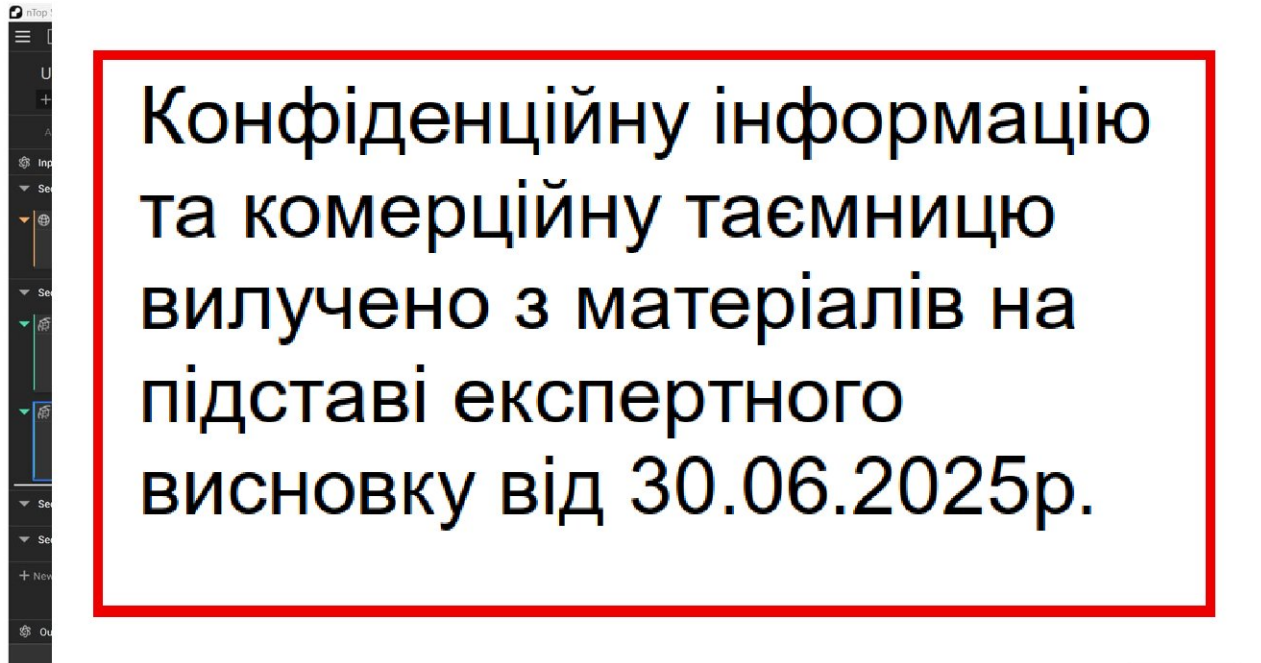


Рисунок 8 – Пустотіла оболонка з припуском 0,75 мм

За допомогою блоку Graph Unit Cell створюється базова комірчаста структура в пустотілій деталі рис. 9



Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Рисунок 9 – Створення комірчастої структури

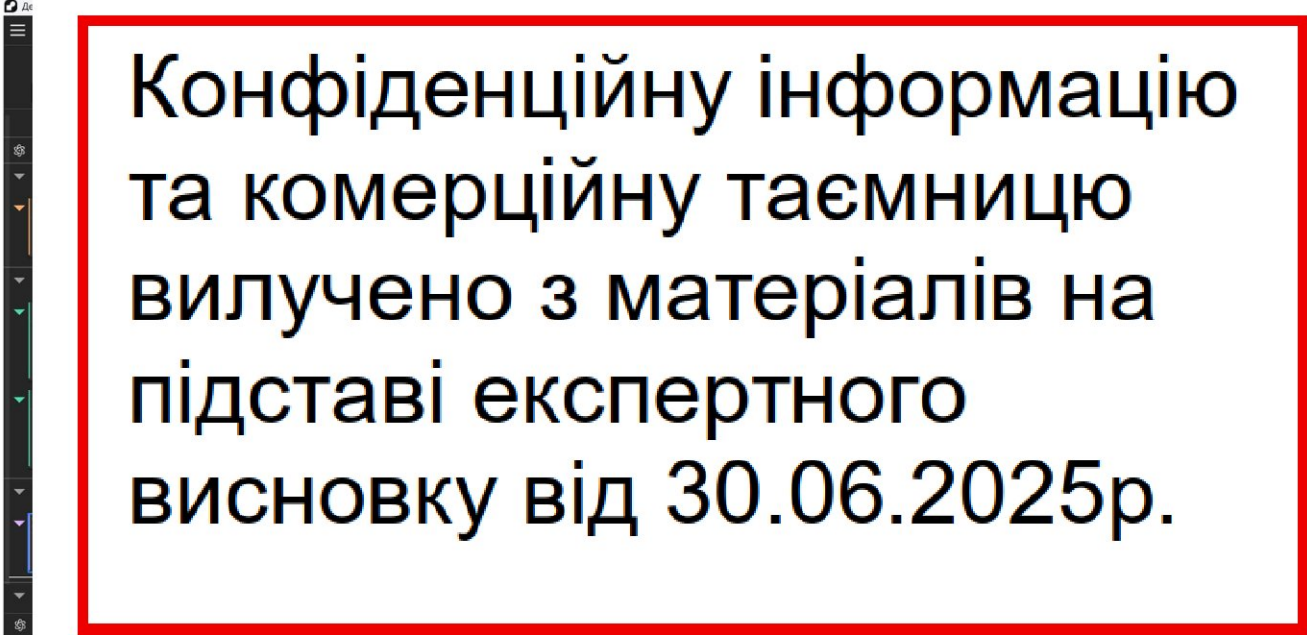
Форма комірчастої структури обирається Fluorite рис. 10.



Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Рисунок 10 – Комірчастої структура форми Fluorite

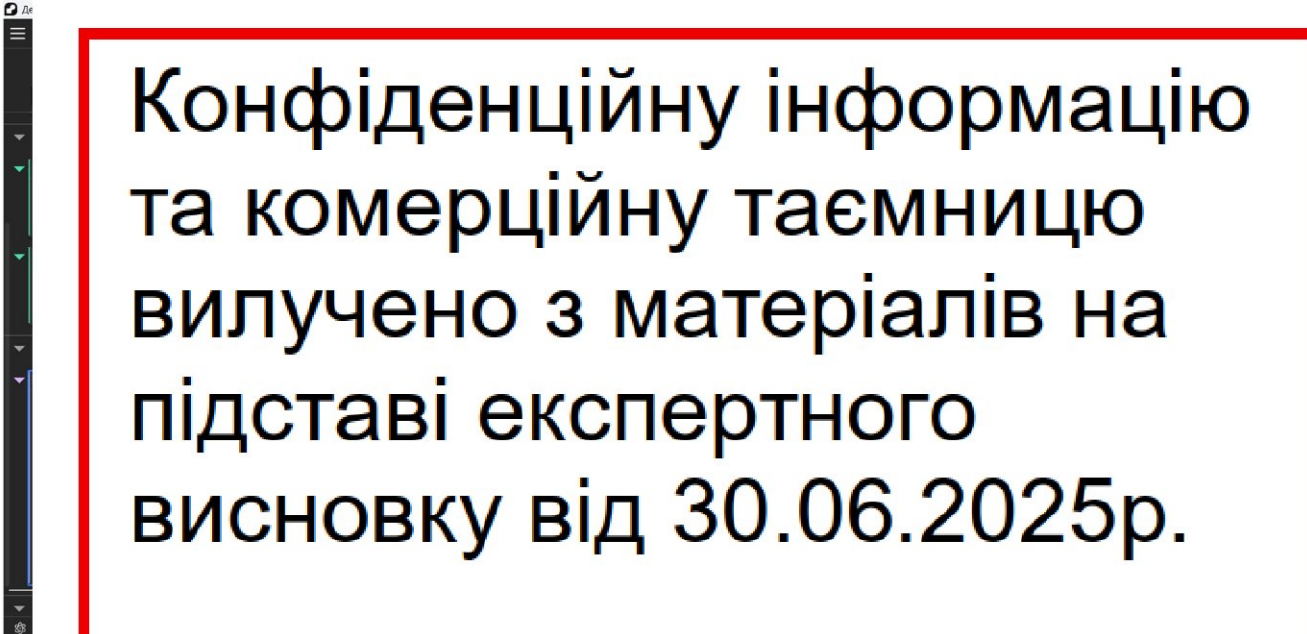
Принцип побудови комірчастої структури обирається за блоком Cylindrical Volume Lattice рис. 11.



Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Рисунок 11 – Вибір принципу побудови комірчастої структури


В рядку Volume обертається деталь «Вал-шестерня» рис. 12.



Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Рисунок 12 – Вибір об'єму генерації комірчастої структури


Товщину комірчастої структури обираємо 0,3 мм рис. 13.



Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Рисунок 13 – Товщина комірчастої структури 0,3мм

Генерація комірчастої структура в деталі «Вал шестерня» рис. 14



Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Рисунок 14 – Генерація комірчастої структури

Загальний вигляд згенерованої комірчастої структури по контуру деталі «Вал-шестерня» рис. 15.

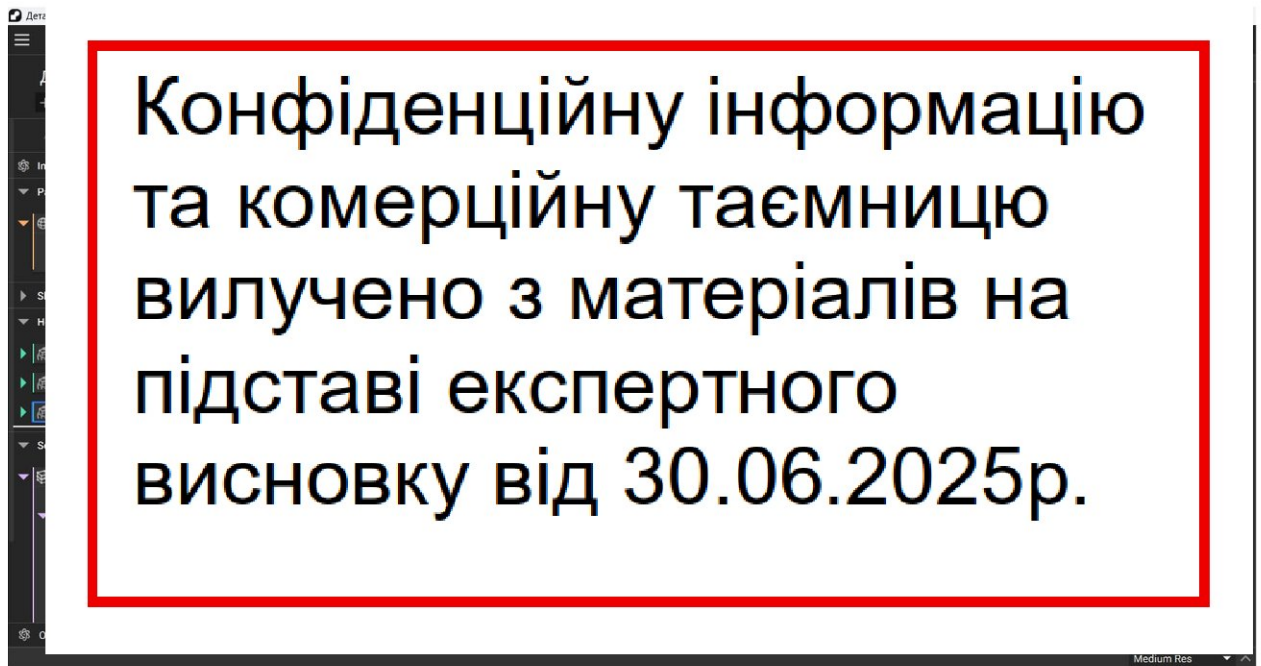


Рисунок 15 – Згенерована комірчастої структури

Тип комірчастої структури буде «Відкритий» тому необхідні технічні отвори які будуть відповідати за вихід дисперсного порошку після друку деталі. За допомогою блока Circle створюється коло з радіусом 3 мм на торцю деталі рис. 16.

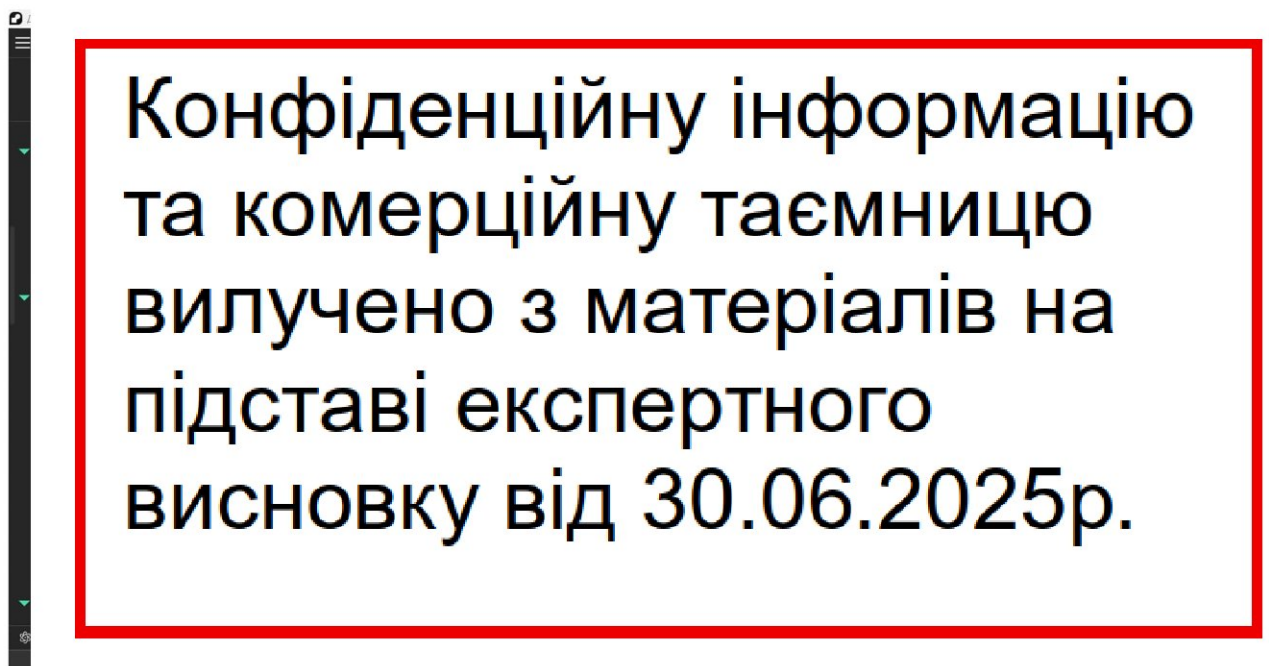


Рисунок 16 – Коло радіусом 3 мм


За допомогою блока Extrude Profile видавлюється коло радіусом 3 мм на довжину 8 мм рис. 17.



**Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.**

Рисунок 17 – Видавлений циліндр радіусом 3 мм та довжиною 8 мм


Блок Boolean Subtract вирізає отвір радіусом 3мм в оболонці деталі за допомогою щойно створеного циліндра рис. 18.



**Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.**

Рисунок 18 – Вирізаний отвір радіусом 3 мм

При об'єднанні комірчастої структури та оболонки видно, що певні частини комірчастої структури створилися за межами оболонки деталі. Щоб видалити зайвий матеріал використовується блок Boolean Intersect. Видаляється комірчаста структура, що виходить за межі оболонки деталі рис. 19.



**Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.**

Рисунок 19 – Потенційні артефакти на поверхні деталі

Видаляється зайвий матеріал комірчастої структури за допомогою блока Boolean Intersect. Обертається тіло створеної оболонки та комірчастої структури. Все що виходить за межі тіла оболонки видаляється блоком рис. 20.



**Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.**

рис. 20 — етап повернення деталі

За допомогою блока Boolean Union об'єднується два тіла комірчастої структури та оболонку деталі в 3мм рис. 21.

**Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.**

Рисунок 21 – Суцільне тіло деталі

Для покращення видалення дисперсного порошку та зменшення об'єму матеріалу конструкції створюється додаткове наскрізний отвір в комірчастій структурі та оболонці деталі. Створюється круг радіусом 1.5 мм за допомогою блока Circle рис. 22.

**Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.**

Рисунок 22 – Круг радіусом 1.5 мм

Видавлюється створений круг мінімум на всю довжину деталі рис. 23.



**Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.**

Рисунок 23 – Створення циліндр довжиною 130мм та радіусом 1,5 мм

За допомогою блока Boolean Subtract видаляється матеріал який знаходився в межах видавленого об'єму циліндру рис. 24.

**Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.**

Рисунок 24 – Наскрізний отвір радіусом 1,5мм

Наступна маніпуляція проводиться з оболонкою деталі з припуском рис. 25.

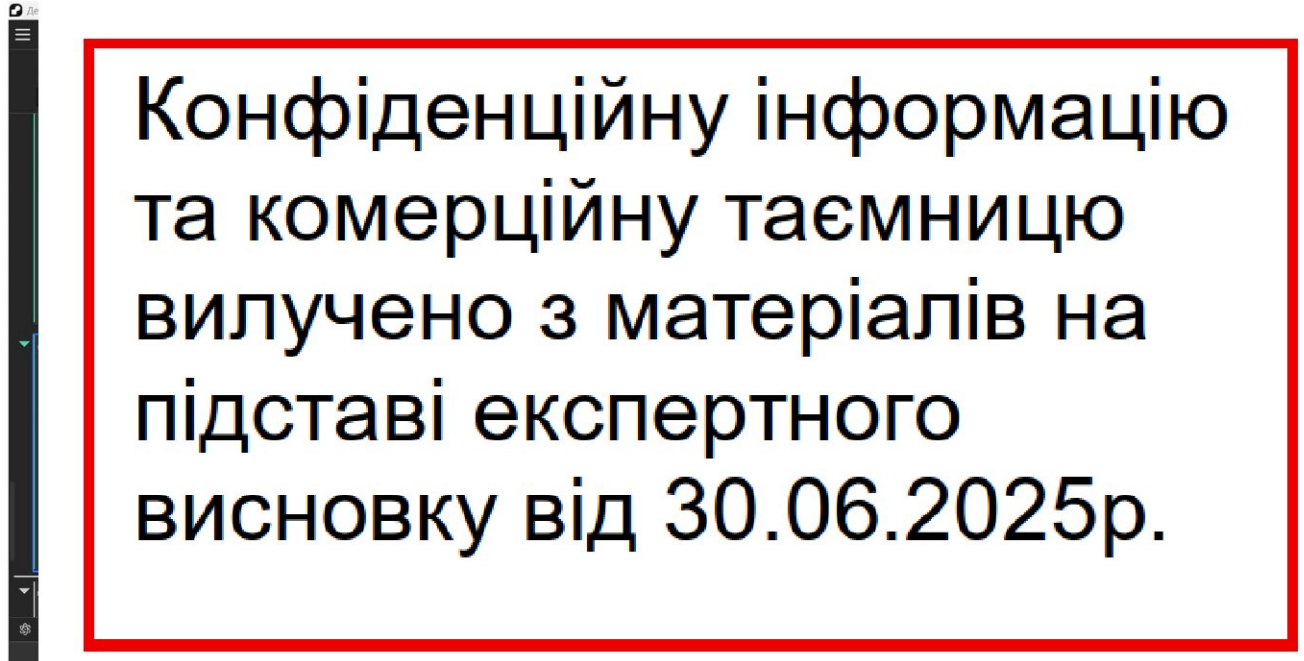


Рисунок 25 – Наскрізний отвір в оболонці з припуском

За допомогою блока Mass Properties розраховується об'єм та маса деталей. Для матеріалу MS1 густина 8.0 - 8.1 г/см<sup>3</sup>. Обирається середнє значення 8.05 г/см<sup>3</sup> = 8050 кг/м<sup>3</sup>. Спершу розраховується значення для готової деталі рис. 26.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Рисунок 26 – Характеристики деталі без припуску

Другий розрахунок проводиться для заготовки з припуском 0,75мм яка буде друкуватися рис. 27.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Рисунок 27 – Характеристики деталі з припуском 0,75мм

Третій розрахунок проводиться для монолітної деталі «Вал-шестерня»  
рис. 28.



**Конфіденційну інформацію  
та комерційну таємницю  
вилучено з матеріалів на  
підставі експертного  
висновку від 30.06.2025р.**

Рисунок 28 – Характеристики монолітної деталі «Вал-шестерня»

Розрахований об'єм монолітної деталі становить  $\approx 50\,908\text{мм}^3$  та відповідно модифікованою комірчастою структурою деталі об'єм становить  $\approx 35\,865\text{мм}^3$ . Таким чином, об'єм модифікованої деталі вдалося зменшити на  $\approx 30\%$ , що пропорційно вплинуло на масу деталі. Цей показник можна збільшити змінюючи комірчасту структуру та товщину оболонки деталі але потрібно враховувати призначення деталі та її вимоги до навантажень.

Зменшення об'єму комірчастою структурою типу Fluorite порівняно з монолітною деталлю дозволяє знизити витрати порошку MS1 приблизно на 15 000 грн за партію з 8 деталей (за ціною 200 USD/кг). Це також скорочує час друку на машині EOS M 280 приблизно на 20%, що підвищує економічну ефективність. Технічні отвори діаметром 6 мм і 3 мм полегшують видалення порошку та сприяють економії матеріалу. Проектування в nTop дозволило оптимізувати конструкцію для SLM, а економія порошку та часу друку підтверджує доцільність цього підходу.

## ВИСНОВКИ

У сучасній ринковій економіці виробництво постійно розвивається, а співвідношення між масовим та індивідуальним виготовленням деталей відіграє важливу роль у машинобудівній галузі. Особливо поширеними є серійне та дрібносерійне виробництво, зокрема для деталей типу "Вал", оскільки підприємства періодично стикаються з потребою в індивідуальних рішеннях. У цьому контексті деталь "Вал-шестерня" стала об'єктом дослідження: проаналізовано її конструкцію, призначення, властивості матеріалу та складено річну програму виробництва, що дозволило оцінити не лише технічні, а й економічні аспекти її виготовлення.

У рамках кваліфікаційної роботи розроблено прогресивну технологію обробки деталі "Вал-шестерня", адаптовану до умов дрібносерійного виробництва. Ця технологія враховує інноваційні методи створення режимів різання та формування поверхонь за допомогою програм CAD/CAM, що забезпечує високу точність і якість обробки. Водночас вона сприяє економії витрат завдяки оптимізації використання матеріалів і робочої сили. Застосування сучасних верстатів з ЧПК, хоча й вимагає значних початкових інвестицій, у довгостроковій перспективі знижує витрати за рахунок підвищення ефективності виробництва та зменшення відходів, що є ключовим для дрібносерійного виробництва, де важливо мінімізувати собівартість кожної деталі.

Детально описано конструкторські та технологічні особливості деталі, а також проведено оцінку технологічності її конструкції, що дало змогу обрати оптимальний метод отримання заготовки. На основі розрахунків норм часу запропоновано технологічні маршрути обробки, які не тільки відповідають технічним вимогам, а й скорочують витрати на обладнання та робочий час. Використання високої жорсткості та точності верстатів з ЧПК дозволяє досягти необхідної точності та шорсткості поверхні під час чистового точіння, уникаючи потреби в шліфувальному верстаті. Це знижує капітальні

витрати на додаткове обладнання та спрощує виробничий процес. Крім того, застосування допоміжної фрезерної головки для обробки евольвентних поверхонь усуває необхідність використання фрезерного верстата, що додатково зменшує витрати на обладнання та переналаштування.

У науково-дослідному розділі представлено модифіковану заготовку деталі "Вал-шестерня" з інтегрованою комірчастою структурою, створеною за допомогою технологій адитивного виробництва. Завдяки цьому підходу на  $\approx 30\%$  зменшується об'єм і вага деталі, що призводить до економії матеріалу, особливо цінного при використанні дорогих сплавів. Зменшення ваги також сприяє зниженню транспортних і експлуатаційних витрат, що має стратегічне значення для галузей, де вага є критичним фактором, наприклад, в авіаційній чи космічній промисловості.

Таким чином, розроблена технологія обробки деталі "Вал-шестерня" не лише відповідає високим технічним стандартам, а й демонструє значну економічну доцільність. Оптимізація виробничого процесу, скорочення витрат на обладнання та матеріали, а також використання інноваційних методів адитивного виробництва роблять цей підхід перспективним для впровадження в сучасне машинобудування, поєднуючи технічну досконалість із економічною вигодою.

## Література

1. Дербабa В.А. Evaluation of the adequacy of the statistical simulation modeling method while investigating the components presorting processes/ В.А. Дербабa, В.В. Зіль, С.Т. Пацера // Scientific Bulletin of National Mining University. Scientific and technical journal. – Дніпропетровськ. – 2014. – № 5(143). – С. 45–50 (Журнал включено до Міжнародної наукометричної бази даних SciVerseSCOPUS).
2. Алгоритм імітаційно-статистичного моделювання двохпараметричного допускового контролю циліндричної поверхні та його програмна реалізація у NI LabVIEW / С.Т. Пацера, В.І. Корсун, В.А. Дербабa, П.О. Ружин // Системи обробки інформації. (Index Copernicus, General Impact Factor, Scientific Indexed Service, Google Scholar) – Харків : Харківський університет повітряних сил ім. Івана Кожедуба, 2016. – №6(143). – С. 116 – 119.
3. Алгоритмічна модель розрахунку відхилення профілю повздожнього перетину валу та її програмна реалізація у NI LabVIEW НТУ «Дніпровська політехніка» Щербина Є. Ю.
4. Bohdanov, O., Protsiv, V., Derbaba, V. & Patsera, S. (2020) Model of surface roughness in turning of shafts of traction motors of electric cars. «NAUKOVYI VISNYK Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu», 1, 41-45. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-1/041> (Scopus).
5. Model-based chatter stability prediction and detection for the turning of a flexible workpiece “Mechanical Systems and Signal Processing”: Volume 100, 1 February 2018, Pages 814-826.
6. Chatter avoidance in cutting highly flexible workpieces “CIRP Annals”: Volume 66, Issue 1, 2017, Pages 377-380.
7. Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. Springer.

8. Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. Springer.
9. Frazier, W. E. (2014). Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(6), 1917-1928.
10. EOS GmbH. (n.d.). Material data sheet: EOS MaragingSteel MS1. Retrieved from <https://www.eos.info/metal-solutions/metal-materials/data-sheets/mds-eos-maragingsteel-ms1>
11. Найкращі рішення для обробки. Лінійка необертальних інструментів. Токарна обробка. Обробка канавок. Різьбонарізання. Відрізання. Метрична версія каталогу 2019. 08/2020 3395080. Member IMC Group ISCAR / [www.iscar.com.ua](http://www.iscar.com.ua)
12. Найкращі рішення для обробки. Фрезерування. Свердління. Інструментальна оснастка. Метрична версія каталогу 2020-2021. 10/2020 3395081. Member IMC Group ISCAR / [www.iscar.ua](http://www.iscar.ua)
13. Петраков Ю.В. Розвиток САМ-систем автоматизованого програмування верстатів з ЧПК: Монографія. – Київ, Січкара, 2011. – 220 с.
14. Дубовой В.М. Моделювання та оптимізація системи: підручник / Дубовой В.М., Кветний Р.Н., Михальов О.І., Усова А.В. – Вінниця: ПП «ТД Едельвейс», 2017. – 804с.
15. Васильченко Я.В. Математичне моделювання процесів різання та різальних інструментів. Практикум. ДДМА, Краматорськ, 2019. – 249с
16. Zhuravel, O. Yu, Derbaba, V.A., Protsiv, V.V., & Patsera, S.T. (2019). Interrelation between Shearing Angles of External and Internal Friction During Chip Formation. *Solid State Phenomena. Materials Properties and Technologies of Processing*, (291), 193-203. - 2019  
[doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.291.193](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.291.193).
17. Щербина Є.Ю. Критерії стійкості ріжучого інструменту для висошвидкісної обробки / Є.Ю. Щербина, В.А. Дербабя, В.А. Козечко // Збірник наукових праць НГУ. – Д.: Державний вищий навчальний заклад

«Національний гірничий університет», 2022 – № 67 – С.77-95  
<https://doi.org/10.33271/crpnmu/67.077>.

18. Kravchenko, Yu., & Derbaba, V. (2020). Empirical definition of the shearing angle and chip-edge contact length when cutting. Збірник наукових праць НГУ. – Дніпро: Національний ТУ «Дніпровська політехніка», 63, 123-133. <http://znp.nmu.org.ua/index.php/en/archives/33-63en/358-63en11>.