

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

Механіко-машинобудівний факультет
Кафедра технологій машинобудування та матеріалознавства

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеня магістра

Здобувачу вищої освіти Куваєв Микола Володимирович
(ПІБ)

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

спеціальності 131 Прикладна механіка

за освітньо-науковою програмою «Наскрізний інжиніринг
машинобудівного виробництва»

на тему: «Дослідження оптимальних варіантів технології виготовлення
деталі «Ступиця» методами адитивних технологій з постмеханічною обробкою.

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

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	Дербаба В.А.			
розділів:				
Аналітичний	Дербаба В.А.			
Технологічний	Дербаба В.А.			
Спеціальний	Дербаба В.А.			
Науково- дослідницький	Дербаба В.А.			
Рецензент	Корсун В.І.			
Нормоконтролер	Рубан В.М.			

ЗАТВЕРДЖЕНО:
завідувач кафедри

технологій машинобудування та матеріалознавства
(повна назва)

_____ В.А. Дербаб
(підпис) (ініціали та прізвище)

« _____ » _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу ступеня магістра

здобувачу вищої освіти Куваєв М.В.
(прізвище та ініціали)

академічної групи 131М-23Н-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 - технологія виготовлення деталі з використанням
адитивних технологій з постмеханічною обробкою .

Предмет досліджень - особливості застосування адитивних технологій для
виготовлення деталі з досягненням вимог міцності, точності та надійності..

Мета - розробка та удосконалення технологічних процесів деталі
виготовленої методом адитивних технологій з постмеханічною обробкою

Вихідні дані для проведення роботи - 1) аналіз джерел інформації з питань
виготовлення деталей методом адитивних технологій; 2) імітаційно-статистичне
моделювання контрольно-вимірювальних систем; 3) аналіз застосування
перетворення Бокса-Мюлера та полярного методу Д. Марсалія та Т. А. Бреем для
реалізації генератора випадкових чисел за нормальним розподілом.

3 ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Новизна - удосконалено підхід до виготовлення складних деталей з
застосуванням метода адитивних технологій. Застосовано перетворення Бокса-

Мюлера та полярного методу Д. Марсалія та Т. А. Брєем для реалізації генератора випадкових чисел за нормальним розподілом для вдосконалення програми імітаційно-статистичного моделювання контрольно-вимірювальних систем.

Практична цінність - детальний опис процесу виготовлення деталі з використанням адитивних технологій, а також вдосконалення програми імітаційно-статистичного моделювання контрольно-вимірювальних систем, що дозволить вирішити проблему адекватного вибору вимірювального інструменту.

4 ВИМОГИ ДО РЕЗУЛЬТАТІВ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Провести дослідження і надати опис виготовлення деталі «Ступиця» методом адитивних технологій.

5 ЕТАПИ ВИКОНАННЯ РОБІТ

Найменування етапів робіт	Строки виконання робіт (початок-кінець)
Аналітичний розділ	29.01.2025-17.02.2025
Технологічний розділ	18.02.2025-24.03.2025
Спеціальний розділ	25.03.2025-21.04.2025
Науково-дослідницький розділ	22.04.2025-19.05.2025

Завдання видано

_____ (підпис керівника)

В.А. Дербаб

_____ (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)

М.В. Куваєва

_____ (ініціали та прізвище)

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1. Аналітичний розділ.....	7
1.1 Об'єкт виробництва	7
1.2 Аналіз технологічності конструкції	11
2. Технологічний розділ.....	14
2.1 Встановлення виробничої програми випуску деталей.....	14
2.2 Вибір способу отримання заготовки	15
2.3 Розробка технологічного маршруту виготовлення деталі	20
2.4 Розрахунок припусків механічної обробки	22
2.5 Детальна розробка операцій технологічного процесу	23
2.6 Виготовлення заготовки методом адитивних технологій	28
3. Спеціальний розділ.....	34
3.1 Реалізація генератора випадкових чисел за нормальним розподілом у середовищі LabVIEW для програми імітаційно-статистичного моделювання контрольно-вимірювальних систем	34
4. Науково-дослідницький розділ.....	45
4.1 Дослідження та розрахунок запасу несучої здатності деталі «Ступиця» у складі ротора.....	45
Висновки	52
Перелік посилань	53

ВСТУП

Довгий час виготовлення деталей складних форм мало обмеження зі сторони можливостей існуючих технологій механічних обробок. При проектуванні таких деталей інженер -конструктор часто жертвував оптимальністю конструкції на користь технології виготовлення. Такий підхід актуальний і сьогодні, особливо для деталей, які випускаються серійно. Але є випадки, коли оптимальна конструкція важливіша за технологічність виготовлення. Зазвичай це складні системи з високими вимогами до якості та міцності конструкції деталей. Наприклад, це аерокосмічна галузь, де немає потреби в великих обсягах, але є потреба, щоб деталь була максимальна оптимізована за критеріями вага, розміри, міцність та якість.

З появою адитивних технологій дана проблема була вирішена. 3D друк металами має низку переваг перед традиційними методами виробництва, серед яких можливість створення складних геометричних форм, зменшення матеріальних витрат, особливо для одиничних та дрібносерійних деталей, легка оптимізація конструкції, висока швидкість прототипування.

3D-друк металевими сплавами є однією з найбільш перспективних технологій сучасності, яка дозволяє значно змінити підходи до виробництва і виготовлення деталей в різних галузях. Вона відкриває нові горизонти для інновацій, дозволяючи створювати вироби, які раніше вважалися недосяжними. Незважаючи на певні виклики, такі як висока вартість і необхідність вдосконалення процесів, переваги цієї технології – від економії ресурсів до індивідуалізації – роблять її ключовим елементом майбутнього виробництва. З розвитком науки й техніки 3D-друк металевими сплавами має всі шанси стати основою для наступної промислової революції, а її переваги, такі як можливість виготовлення

складних конструкцій, швидкість прототипування і кастомізація виробів, роблять її важливим інструментом у сучасному виробництві. Технології 3D друку металами мають величезний потенціал для подальшого розвитку, і вже зараз вони використовуються для виготовлення компонентів в аерокосмічній, медичній та автомобільній промисловості.

З кожним роком технологія 3D-друку металевими сплавами стає доступнішою та ефективнішою. Очікується, що:

- розробка нових сплавів із покращеними властивостями (наприклад, жаростійкість, корозійна стійкість) розширить сфери застосування.

- зниження вартості обладнання та матеріалів зробить технологію масовою.

- інтеграція штучного інтелекту в процеси проектування й друку підвищить точність і оптимізує витрати.

- гібридні системи (поєднання 3D-друку з традиційними методами) стануть стандартом у промисловості.

В деяких випадках, коли необхідно досягти високих квалітетів точності, після 3D друку необхідна постмеханічна обробка деталі, що необхідно враховувати перед друком. Для таких розмірів необхідно задати припуски на механічну обробку. Зазвичай такі припуски встановлюються виходячи з досвіду та можливостей підприємства.

В даній роботі був відображені технологічні особливості виготовлення деталі з застосуванням сучасних адитивних технологій та постмеханічною обробкою на верстатах з ЧПК.

1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Об'єкт виробництва

Деталь ступиця входить до складу високошвидкісного трьохфазного синхронного генератора з постійними магнітами, що використовується в аерокосмічній отраслі та показаний на рисунку 1.1. Даний генератор повинен забезпечувати електрикою бортову мережу.

Деталь ступиця представлена на рис.1.2



Рис. 1.1 Деталь Ступиця

Дана деталь входить до складу складальної одиниці ротор (рис.1.2) і виконує роль несучої конструкції і одночасно бандажу для постійних магнітів. При обертанні ротора магнітне поле постійних магнітів виробляє трьохфазний електричний струм в обмотці статора. При проектуванні бандажу ротора необхідно було враховувати ряд вимог конструювання:

- конструкція повинна бути міцна, щоб витримувати велику відцентровану силу, яку створюють постійні магніти при обертанні зі швидкістю 50 000об/хв;
- мінімально можлива маса та габарити, що є галузевою вимогою;

- конструкція повинна бути виконана з немагнітного матеріалу, тобто відносна магнітна проникність такого матеріалу повинна дорівнювати 1 або бути наближена до 1;
- оскільки деталь знаходиться у змінному магнітному полі, матеріал деталі повинен мати високе значення питомого електричного опору, а конструкція повинна містити відповідні елементи для зниження електричних втрат.
- матеріал деталі не повинен мати протипоказань роботи в парах кисню, та бути кріогеним
- температурний діапазон роботи деталі від -183°C до $+50^{\circ}\text{C}$.



Рис. 1.2 Деталь Ротор

Щоб зменшити кількість деталей, збірок, підвищити точність виконання ротора електрогенератора бандаж ротора був поєднаний з несучою конструкцією, яка передає обертання від валу всього агрегату до ротора. Щоб зняти технологічні обмеження на виготовлення, знизити собівартість та виконати всі вимоги до деталі, деталь була спроектована під

виготовлення методом адитивних технологій, або 3D друку з подальшою пост обробкою на токарно фрезерних станках.

Технологія 3D-друку, або адитивного виробництва, за останні десятиліття стала революційним інструментом у різних галузях промисловості, науки та медицини [1]. Якщо на початкових етапах розвитку 3D-друк асоціювався переважно з пластиковими матеріалами, то сучасні досягнення дозволяють використовувати металеві сплави для створення складних і високоточних деталей. 3D-друк металевими сплавами відкриває нові можливості для аерокосмічної, автомобільної, медичної та оборонної промисловостей, дозволяючи виготовляти деталі з унікальними властивостями, які важко або неможливо отримати традиційними методами обробки [2].

Матеріалом для деталі був обраний сплав Inconel 718 [3]. Inconel 718 — це високоміцний нікелевий сплав, який зберігає свою механічну міцність при температурах до 700-800°C. Завдяки термічній обробці його міцність значно підвищується. Сплав має високу стійкість до окислення і корозії навіть у агресивних середовищах, таких як кислоти, луги та морська вода.

Він характеризується гарною зварюваністю та високою в'язкістю при різних температурах. Крім того, Inconel 718 демонструє чудову стійкість до втоми та крипінгу, що робить його ідеальним для компонентів, які працюють під тривалими навантаженнями.

Основні сфери застосування:

- Аерокосмічна промисловість (турбінні лопатки, диски, ущільнення реактивних двигунів)
- Газові турбіни (компоненти для енергетичних та промислових турбін)
- Ракетні двигуни (камери згоряння, сопла)
- Хімічна промисловість (теплообмінники, реактори, клапани)
- Морська та офшорна промисловість (стійкість до корозії в

морській воді)

- 3D-друк (виготовлення складних авіаційних та космічних деталей)

Завдяки поєднанню міцності, термостійкості та корозійної стійкості, Inconel 718 залишається одним із ключових матеріалів для високотехнологічних галузей.

Хімічний склад Inconel 718 вказаний в таблиці 1.1.1.

Таблиця 1.1.1 . Хімічний склад Inconel 718:

Елемент	Вміст (%)
Al	1. 0,2-0,8
Ta	2. $\leq 0,05$
Cr	3. 17-21
Cu	4. $\leq 0,3$
Mo	5. 2,8-3,3
Nb	6. 4,75-5,5
O	7. $\leq 0,03$
S	8. $\leq 0,015$
Ti	9. 0,6-1,2
Si	10. $\leq 0,35$
C	11. 0,02-0,08
Co	12. ≤ 1
Mn	13. $\leq 0,35$
Ni	14. 50-55
N	15. $\leq 0,025$
P	16. $\leq 0,015$

Після виготовлення деталі адитивним методом і подальшої механічної обробки, деталь необхідно піддати термічній обробці по SAE

AMS 5664 [4].

SAE AMS 5664 — це технічна специфікація, що визначає вимоги до жароміцного нікелевого сплаву Inconel 718 у формі прутків, поковок, кілець та інших виробів, призначених для застосування в авіаційній, аерокосмічній та інших високотемпературних галузях. Регламентує стан загартований стан постачання.

Механічні характеристики загартованого Inconel 718 наведені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2.2 – Механічні властивості металу Inconel 718, загартованого

t, K (°C)	E, МПа	σ_b , МПа	σ_T , МПа	δ , %	НВ
293 (20)	165000	889	511	45	≥ 341

До того ж даний матеріал не магнітний з відносною магнітної проникністю наближеною до магнітної проникності повітря – 1, а його питомий електричний опір дорівнює $\approx 1,25 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{м}$ (або $125 \mu\Omega \cdot \text{см}$). Для порівняння питомий опір міді (Cu) $\approx 1,68 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{м}$ (або $1,68 \mu\Omega \cdot \text{см}$). Тобто Inconel 718 майже у 75 разів гірше проводить електричний струм аніж мідь, що значно знижує втрати на вихрові струми.

1.2 Аналіз технологічності конструкції

Забезпечення технологічності конструкції виробів на всіх етапах їх створення регламентується Єдиною системою технологічної підготовки виробництва. Виділяють три основні аспекти технологічності: виробничий, експлуатаційний і ремонтний. Головним критерієм оцінки технологічності є економічна доцільність за умови дотримання заданих показників якості та відповідності умовам виробництва й експлуатації.

На стадії розробки технологічного процесу виготовлення деталі, коли конструкторська документація не підлягає значним коригуванням, важливо провести аналіз технологічності деталей. Це дозволяє на основі практичного досвіду визначити рівень відповідності між якісними характеристиками виробу та вимогами виробництва. Для оцінки використовують кількісні показники, які допомагають визначити ступінь відповідності конструкції критеріям технологічності.

Розглядаючи конструкцію деталі та вимоги до її виробництва, обрано технологію 3D-друку на основі порошкового лазерного наплавлення. Це рішення дозволяє отримати складну геометрію без необхідності використання традиційних методів лиття або механічної обробки на початковому етапі.

Застосування сплаву Inconel 718 обумовлено його високими механічними характеристиками, термостійкістю та корозійною стійкістю, що робить матеріал придатним для роботи в екстремальних умовах. Однак після адитивного виготовлення деталей потребує механічної обробки для досягнення необхідної точності та якості поверхні.

Конструкція виробу передбачає наявність базових поверхонь, які можуть бути використані для встановлення у пристосуваннях при подальшій механічній обробці. Точні базові елементи формуються ще на етапі друку, що мінімізує похибки при їх подальшому доопрацюванні.

Одним із технологічних викликів є обробка жорсткого сплаву Inconel 718, що потребує застосування спеціального ріжучого інструменту, оптимізованих режимів різання та систем охолодження для зниження навантаження на ріжучі кромки. Висока міцність матеріалу може призводити до підвищеного зносу інструменту, тому важливо враховувати раціональні стратегії механічної обробки.

Шорсткість оброблених поверхонь відповідає заданим вимогам, завдяки чому забезпечується їхня сумісність з іншими елементами

конструкції. Оптимальна послідовність операцій дозволяє мінімізувати внутрішні напруження, що виникають під час друку, та забезпечити високу якість кінцевого виробу.

Таким чином, поєднання технологій 3D-друку та прецизійної механічної обробки дає змогу створювати складні та високоточні деталі зі сплаву Inconel 718, що відповідають жорстким експлуатаційним вимогам.

Визначимо коефіцієнт точності обробки:

$$K_{\text{тч}} = 1 - \frac{1}{A_{\text{ср}}} = 0,89 \quad ((1.1))$$

де $A_{\text{ср}}$ – середній квалітет розмірів виробу, який знаходиться за формулою:

$$A_{\text{ср}} = \frac{\sum A \cdot n_i}{\sum n_i} = 9,1 \quad ((1.2))$$

де A – квалітет обробки;

n_i – число розмірів відповідного квалітету.

Отримане значення $K_{\text{тч}} = 0.89$ більше нормативного 0.8, отже, деталь є технологічною за цим критерієм.

В свою чергу коефіцієнт шорсткості поверхні дорівнює:

$$K_{\text{ш}} = 1 - \frac{1}{B_{\text{ср}}} = 0,39 \quad ((1.3))$$

де $B_{\text{ср}}$ – середнє значення параметра шорсткості, що визначається за формулою:

$$B_{\text{ср}} = \frac{\sum B \cdot n_i}{\sum n_i} = 1,6 \text{ мкм} \quad ((1.4))$$

де B – числове значення параметра шорсткості по шкалі R_a ГОСТ 2789-73;

n_i – число поверхень з відповідною шорсткістю.

2. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Встановлення виробничої програми випуску деталей

Зазвичай річна потреба агрегатів, до складу яких входить дана деталь є не великою, але при розробці виробничої програми випуску деталей в рік необхідно також враховувати запасні деталі, а також певну кількість, яка повинна пройти контрольно-вибіркові випробування. На початковому етапі проектування технологічного процесу кількість можливо визначити таким чином:

$$N = N_{\text{п}} \cdot q \cdot \left(1 + \frac{h}{100}\right) = 50 \cdot 1 \cdot \left(1 + \frac{20}{100}\right) = 60 \text{ шт/рік} \quad ((2.1))$$

де:

- $N_{\text{п}}$ – річна програма випуску виробів;
- q – кількість деталей одного найменування в одному виробі;
- h – відсоток деталей, призначених на запасні частини, контрольно-вибіркові випробування (15-20%).

$$n = \frac{N \cdot a}{\Phi} = \frac{60 \cdot 60}{250} = 14 \quad ((2.2))$$

Одним з основних показників серійного виробництва є розмір партії деталей, які одночасно запускаються у виробництво. Його визначають за формулою:

$$n = \frac{N \cdot a}{\Phi} = \frac{60 \cdot 60}{250} = 14 \quad ((2.2))$$

де:

- a – періодичність запуску у виробництво, днів;
- Φ – кількість робочих днів у році (250).

2.2 Вибір способу отримання заготовки

Як було вказано в першому розділі, для отримання заготовки було обрано виробництвом шляхом 3-D друку. Це продиктовано вимогами креслення деталі, її складної форми та використання спеціального сплаву Inconel 718.

3D друк або адитивне виробництво — це технологія, яка дозволяє створювати об'єкти шляхом покрокового нашарування матеріалу. За останні десятиліття ця технологія стала надзвичайно популярною і застосовується в різних галузях, таких як медицина, аерокосмічна промисловість, автомобільна промисловість та багато інших. Одним з найбільш перспективних напрямків є 3D друк металами, зокрема металевими сплавами, що дозволяє виготовляти складні геометричні форми, які не можна було б створити традиційними методами обробки матеріалів.

3D друк металами полягає в створенні тривимірних об'єктів шляхом покрокового нанесення шарів металевого матеріалу. Існує кілька основних методів 3D друку металами:

1. Селективне лазерне плавлення (SLM – Selective Laser Melting)
У цій технології лазер повністю плавить металевий порошок у заданій зоні, створюючи деталі шару за шаром. SLM забезпечує високу точність і щільність (близько 99–100%), що робить її ідеальною для складних компонентів, наприклад, у аерокосмічній та медичній промисловості. Використовуються сплави титану, нержавіючої сталі, кобальт-хрому, алюмінію тощо [5].

2. Пряме лазерне спікання металу (DMLS – Direct Metal Laser Sintering)

Технологія, схожа на SLM, але історично означала часткове спікання порошку замість повного плавлення. Сьогодні DMLS часто

використовується як синонім SLM у комерційному контексті (особливо компанією EOS), хоча теоретично деталі можуть мати дещо меншу щільність. Підходить для широкого спектра металів і сплавів.

3. Електронно-променеве плавлення (EBM – Electron Beam Melting)

Замість лазера використовується електронний промінь у вакуумній камері для повного плавлення металевого порошку. EBM вирізняється високою швидкістю друку та ефективністю для титанових сплавів, що робить його популярним у медицині (наприклад, для імплантатів) та аерокосмічній галузі. Деталі мають високу міцність, але меншу точність порівняно з SLM через більший розмір пучка.

4. Дуговий дрової друк (WAAM – Wire Arc Additive Manufacturing)

У цій технології металевий дріт плавиться електричною дугою, а деталі формуються пошарово. WAAM підходить для створення великих конструкцій (наприклад, елементів суден чи літаків), але має нижчу точність і якість поверхні порівняно з порошковими методами. Використовується для сталей, алюмінію, титану тощо.

5. Селективне лазерне спікання (SLS – Selective Laser Sintering)
Цей метод зазвичай застосовується до полімерів, але в контексті металів іноді згадується як історичний попередник DMLS. Лазер спікає (а не плавить) порошок, створюючи менш щільні структури. Сьогодні для металів SLS рідко використовується окремо від DMLS/SLM.

6. Пряме енергетичне нанесення (DED – Direct Energy Deposition)
Метод, у якому металевий порошок або дріт плавиться за допомогою концентрованого джерела енергії (лазера, електронного пучка або плазми) і наноситься на поверхню. DED підходить для ремонту деталей і створення великих об'єктів, але має меншу точність, ніж SLM чи EBM [6].

7. Метод FDM для металевих матеріалів (Metal FDM) Використовується нитка з металевого порошку, змішаного з полімерним зв'язуючим. Після друку полімер видаляється (дебіндинг), а деталь спікається в печі. Це дешевший метод, але деталі мають меншу щільність і точність порівняно з SLM чи EBM.

Матеріали для 3D-друку металами включають нержавіючу сталь, титан, алюміній, кобальт-хром, мідь та інші сплави з унікальними властивостями [7]

Переваги 3D друку металевими сплавами [8]:

1. Складність геометрії: Технологія дозволяє створювати складні геометричні форми, які неможливо виготовити традиційними методами, такими як лиття чи фрезерування. Наприклад, внутрішні канали для охолодження чи легкі конструкції з порожнинами.

2. Економія матеріалу: Оскільки процес є адитивним (додається лише необхідний матеріал), це дозволяє знизити витрати на матеріали в порівнянні з традиційними методами обробки.

3. Швидкість виготовлення: Виготовлення прототипів і навіть готових виробів може здійснюватися значно швидше, ніж при використанні традиційних методів, що особливо важливо для швидкого прототипування та інновацій.

4. Виготовлення кастомізованих виробів: 3D друк дозволяє виготовляти продукцію, яка точно відповідає вимогам замовника, що особливо важливо для індивідуальних імплантатів у медицині або спеціалізованих компонентів в аерокосмічній промисловості.

5. Зменшення кількості етапів обробки: 3D друк дозволяє зменшити кількість етапів виробництва, що здешевлює і прискорює процес виготовлення деталей.

6. Скорочення часу виробництва

Можливість швидко переходити від цифрової моделі до готового виробу зменшує час розробки прототипів і запуску виробництва.

До недоліків 3D друку металевими сплавами можна віднести:

1. Висока вартість обладнання: для 3D друку металами потрібне спеціалізоване обладнання, яке може бути дуже дорогим. Це може обмежувати використання цієї технології для малих і середніх підприємств.

2. Обмеження в розмірах: хоча технології 3D друку постійно вдосконалюються, розмір виготовлених об'єктів все ще обмежений розмірами самих принтерів.

3. Механічні властивості: металеві об'єкти, надруковані за допомогою адитивних технологій, можуть мати деякі обмеження щодо механічних властивостей порівняно з тими, які виготовлені традиційними методами.

4. Необхідність постобробки: Після друку металеві деталі часто потребують додаткової обробки, такої як шліфування або термічна обробка для покращення їхніх механічних характеристик та фінішної обробки поверхні.

3-D друк на якісному принтері зазвичай забезпечує 11-12 квалітет точності виготовлення. При проектуванні деталі частина поверхонь та розмірів задовольняє точність та шорсткість, яку забезпечує даний спосіб виготовлення деталей. Але існують розміри та поверхні, для яких є підвищені вимоги по точності та шорсткості. Зазвичай це посадкові поверхні, розміри які важливі для розмірного розрахунку, елементи конструкції на які діє навантаження. Для таких розмірів необхідно закласти припуск та подальшу механічну обробку.

Необхідно врахувати допуски на розмір і закласти додатковий припуск виходячи з практичного досвіду, що відображено в таблиці 2.2.1.

Таблиця 2.2.1 Припуски на механічну обробку

Розмір	Номинальне значення, мм	Допуск розміру, мм	Припуск на сторону, мм	Розмір заготовки, мм
45h7	45	-0.025	1	46±0.125
11±0.02	11	±0.02	1	12±0.09
Ø16.5H6	16.5	+0.011	1	14.5±0.09
44.4f7	44.4	-0.025...-0.05	1	46.4±0.125
Ø68.2H8	68.2	+0.046	1	66.2±0.15
Ø69.4±0.02	69.4	±0.02	1	71.4±0.15
17.9 ^{+0.1}	17.9	+0.1	0.5 та 1	16.4±0.09
3JS9	3	±0.012	0.5	2±0.05
10±0.06	10	±0.06	1	11±0.09
2.5H8	2.5	+0.014	1	3.5±0.05
Ø46k6	46	+0.002...+0.018	1	48±0.125
8h8	8	-0.022	1	9±0.075

Для оригіналу деталі в номінальному розмірі та заготовки була розрахована маса. Так маса деталі складає 63г, а маса заготовки складає 128г. Тобто коефіцієнт вагової точності буде складати:

$$K_{в.т.} = \frac{G_d}{G_z} = \frac{63}{128} = 0,49 \quad (2.3)$$

де G_d – маса готової деталі

G_z – маса заготовки, що надходить з ділянки 3D друку.

На перший погляд значення вагової точності не дуже висока, але виходячи з того, що матеріал Inconel 718 має високу щільність, яка складає 8,19г/см³, та виходячи з високих галузевих вимог до якості продукції, то вважаємо, що дане значення є прийнятне.

2.3 Розробка технологічного маршруту виготовлення деталі

Наступним кроком є розробка технологічного маршруту виготовлення деталі. Для розмірів, квалітет яких є вищим за сучасні можливості адитивних технологій необхідно провести подальшу механічну обробку. В розділі 2.2 саме для таких розмірів були закладені необхідні припуски. В таблиці 2.3.1 наданий перелік оброблюваних поверхонь та методи обробки.

Складна конструкція деталі не дозволяє провести обробку одного типу та з одного установу. Механічна обробка буде поділятися на декілька етапів, де спочатку буде проведена електроерозійна обробка, наступним етапом токарно-фрезерна і вже на завершальному етапі токарна обробка. Технологічними базами для обробки є внутрішня поверхня ступиці та внутрішній посадковий діаметр.

Таблиця 2.3.1 Розміри для постмеханічної обробки

Розмір	Ra (Rz)	Метод обробки
45h7	Ra 1.6	Токарно-фрезерна
11±0.02	Rz 20	Токарна
Ø16.5H6	Ra 0.4	Електроерозія
Ø44.4f7	Ra 1.6	Токарно-фрезерна
Ø68.2H8	Ra 1.6	Токарно-фрезерна
Ø69.4±0.02	Ra 1.6	Токарно-фрезерна
17.9 ^{+0.1}	Ra 1.6	Електроерозія
3JS9	Ra 1.6	Електроерозія
10±0.06	Rz 20	Токарно-фрезерна
2.5H8	Ra 1.6	Токарно-фрезерна
Ø46k6	Ra 0.2	Токарно-фрезерна
8h8	Ra 1.6	Токарна

Складна конструкція деталі не дозволяє провести обробку одного типу та з одного установу. Механічна обробка буде поділятися на декілька етапів, де спочатку буде проведена електроерозійна обробка, наступним

етапом токарно-фрезерна і вже на завершальному етапі токарна обробка. Технологічними базами для обробки є внутрішня поверхня ступиці та внутрішній посадковий діаметр. На етапі електроерозійної обробки будуть виконані розміри під посадку на вал агрегату. На етапі токарно-фрезерної обробки буде проведений основний етап обробки поверхонь з одного установу, завдяки чому можливо буде виконати вимоги креслення і досягти високої точності виготовлення деталі. Обробка буде проведена на фрезерно-розточеному верстаті з числовим програмним забезпеченням з автоматичною зміною інструменту. Подальші етапи точіння пройдуть на токарному верстаті.

Після кожного етапу обробки необхідно проводити попередній контроль виконаних розмірів для мінімізації браку.

Після механічної обробки необхідно провести слюсарну обробку з метою притупити в необхідних місцях гострі кромки. Після цього деталь поступає до відділу контролю якості.

Технологічний маршрут закінчується етапом маркування, упакування та передачі на склад готової продукції. Маршрут обробки деталі «Ступиця» наведено у таблиці 2.3.2

Таблиця 2.3.2 Технологічний маршрут

№ опер	Найменування	Короткий опис операції	Обладнання
005	Заготівельна	Отримання заготовки	EOS M400
010	Контрольна	Перевірка заготовки	
015	Електроерозійна	Обробка поверхонь під посадку на вал	MITSUBISHI MV2400S NewGen
020	Токарно-фрезерна з ЧПК	Основна обробка поверхонь	DMG Mori CMX 70 U
025	Токарна з ЧПК	Доопрацювання довжини	DMG Mori CMX 70 U
030	Токарна з ЧПК	Доопрацювання довжини	DMG Mori CMX 70 U

035	Слюсарна	Затупити гострі кромки	
040	Промивка	Промивка	
045	Контрольна	Контроль розмірів	
050	Маркування	Маркування	
055	Упаковка	Упаковка	
060	Остаточна здача	Здача на склад	

2.4 Розрахунок припусків механічної обробки

Розрахунок припусків здійснюється на дві поверхні одна з яких циліндрична, а друга плоска. На поверхню діаметром $\varnothing 44.4f7(-0.025)$ та лінійний $8h8(-0.022)$. Припуски визначаються розрахунковим методом, результати відображені у таблицях 2.4.1 та 2.5.1

Таблиця 2.4.1

МОП $\varnothing 44.4f7$ (-0.025) (-0.05)	Припуск, мкм	Розрахунко вий розмір, мм	Допуск , мкм	Розмір, мм		Припуск, мм	
				d_{min}	d_{max}	Z_{min}	Z_{max}
Заготовка		46.4	250	46,275	46,525		
Чернове точіння	1650	44,75	160	44,565	44,725	1,55	1,96
Чистове точіння	350	44,4	25	44,35	44,375	0,19	0,375

Таблиця 2.5.1

МОП $8h8$ (-0.022)	Припуск, мкм	Розрахунко вий розмір, мм	Допуск , мкм	Розмір, мм		Припуск, мм	
				d_{min}	d_{max}	Z_{min}	Z_{max}
Заготовка		9	150	8,925	9,075		
Чернове точіння	800	8,2	90	8,11	8,2	0,725	0,965
Чистове точіння	200	8	22	7,978	8	0,11	0,222

2.5 Детальна розробка операцій технологічного процесу

Операція 015 Електроерозійна обробка

Першою операцією у технологічному процесі є високоточна вирізка отвору та формування базових поверхонь на електроерозійному проволочно-вирізному верстаті. Необхідно забезпечити такі розміри:

- $\varnothing 16.5H6$
- $17.9^{+0.1}$
- 3JS9

Максимально допустиме відхилення для зазначених розмірів становить до 0,011 мм, що вимагає застосування обладнання з повторюваністю не гірше ± 5 мкм та точністю позиціонування на рівні 10 мкм або краще.

На основі технічного аналізу ринку верстатів Mitsubishi Electric, до обробки заготовки з Inconel 718 рекомендовано використання наступної моделі:

MITSUBISHI MV2400S NewGen [9] (рис. 2.1)

- Тип: проволочно-вирізний електроерозійний верстат
- Точність позиціонування: ± 3 мкм
- Повторюваність: ± 2 мкм
- Макс. похибка обробки: $\leq \pm 0,008$ мм
- Макс. товщина заготовки: до 305 мм
- Можливість роботи з тугоплавкими матеріалами: так (у т.ч. Inconel, титанові сплави)



Рис. 2.1 MITSUBISHI MV2400S NewGen

Цей верстат забезпечує необхідну геометричну точність та якість обробленої поверхні (R_a до 0,2 мкм) при роботі з важкооброблюваними сплавами, такими як Inconel 718. Завдяки використанню технології цифрового управління з компенсацією температури, досягається стабільна обробка навіть при довготривалих вирізах.

Умови обробки

- Тип дроту: латунний, $\varnothing 0,25$ мм
- Режим обробки: тонка обробка (finish cut), багатопрхідна схема
- Припуски: вхідний припуск згідно таблиці 2.1
- Орієнтація деталі: базування по поверхні М з точністю до 0,1 мм (згідно креслення)
- Охолодження/промивання: деіонізована вода під тиском

Операція 20 Програма

Операція виконується на п'ятиосьовому верстаті з ЧПК DMG Mori SMX 70 U [12] (рис 2.2). Верстат має магазин на 30 інструментальних гнізд і поворотну інструментальну головку, що дозволяє виконувати обробку деталі з одного установу. Заготовка виготовлена методом 3D-друку зі

сплаву Inconel 718 з припусками на обробку. Встановлення здійснюється за допомогою спеціального пристосування із двома базовими циліндричними поверхнями. Інструмент та оснащення обрані з каталогів Sandvik Coromant 2023 [10] і Haimer 2023 [11]. Зміст та оснащення операцій наведено у таблиці 2.7. Для кріплення інструменту використовується шпиндель HSK-A63.



Рис. 2.2 DMG Mori CMX 70 U

Таблиця 2.5.1

№ переходу	Зміст інструментального переходу	Ріжучий інструмент або пластина	Державка	Цанга	Патрон	Режими різання
1	Чорнове фрезерування Ø45h7	R390-032A32-11L	Coromant Capto C6	-	Haimer Power Chuck HSK-A63	Vc=35 м/хв, Sz=0.06 мм/зуб, t=1.5 мм
2	Чистове фрезерування Ø45h7	R216.34-1632-AK16B	Coromant EH 32	ER32-12	Haimer Power Chuck HSK-A63	Vc=30 м/хв, Sz=0.05 мм/зуб, t=0.3 мм
3	Розточування Ø68.2H8	Silent Tools 570-3C-16-150	Coromant Capto C6	-	Haimer Power Chuck HSK-A63	Vc=28 м/хв, S=0.05 мм/об, t=0.3 мм

4	Розточування Ø69.4+0.02	Twin-Bore A790-D20-200	Coromant Capto C6	-	Haimer Power Chuck HSK- A63	Vc=25 м/хв, S=0.04 мм/об, t=0.2 мм
5	Точіння Ø44.4f7	CoroTurn 107 with insert GC1115	-	-	Haimer Power Chuck HSK- A63	Vc=40 м/хв, S=0.07 мм/об, t=0.5 мм
6	Точіння Ø10±0.06	CoroTurn XS	-	-	Haimer Power Chuck HSK- A63	Vc=20 м/хв, S=0.05 мм/об, t=0.3 мм
7	Точіння Ø2.5H8	CoroTurn XS	-	-	Haimer Power Chuck HSK- A63	Vc=15 м/хв, S=0.03 мм/об, t=0.2 мм
8	Точіння Ø46k6	CoroTurn 107 + полірована пластина	-	-	Haimer Power Chuck HSK- A63	Vc=18 м/хв, S=0.04 мм/об, t=0.2 мм

Таблиця 2.5.2 Стисла характеристика верстата DMG Mori CMX 70 U

Параметр	Значення
Довжина інструментального столу, мм	850
Ширина інструментального столу, мм	700
Кількість Т-подібних пазів	5
Конус шпинделя	HSK-A63
Діапазон обертів шпинделя, об/хв	20 - 12000
Потужність шпинделя, кВт	20
Система ЧПК	Siemens Sinumerik 840D sl
Номінальна напруга живлення, В	400
Габаритні розміри (ДхШхВ), мм	2780x2300x2700
Маса, кг	7500

Таблиця 2.5.3 Якість поверхні та метод обробки

Розмір	Ra (Rz)	Метод обробки
45h7	Ra 1.6	фрезерна
Ø44.4f7	Ra 1.6	точіння
Ø68.2H8	Ra 1.6	розточування

Ø69.4±0.02	Ra 1.6	точіння
10±0.06	Rz 20	точіння
2.5H8	Ra 1.6	точіння
Ø46k6	Ra 0.2	точіння

Параметри різання для кожної операції були підібрані практичним шляхом, виходячи з досвіду обробки деталей з Inconel 718.

Для розмірів Ø44.4f7 нижче наведений розрахунок режимів різання.

Режим: $V_c = 40\text{м/хв}$, $S = 0.07\text{мм/об}$, $t = 0.5\text{мм}$, діаметр

Частота обертання:

$$n = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 40}{\pi \cdot 45,4} \approx 280\text{об/хв} \quad (2.4)$$

Подача:

$$V_s = n \cdot S = 280 \cdot 0.07 \approx 19.6\text{мм/хв} \quad (2.5)$$

Час обробки:

$$T_m = \frac{L}{V_s} \cdot k = \frac{11}{4.52} \cdot 5 \approx 0.26\text{хв} \quad (2.6)$$

де k -кількість проходів

Потужність:

$$P = \frac{V_c \cdot K_c \cdot t \cdot S}{60 \cdot 10^6} = \frac{40 \cdot 2000 \cdot 0.5 \cdot 0.07}{60 \cdot 10^6} \approx 0.047\text{кВт} \quad (2.7)$$

де $K_c \approx 2000\text{Н/мм}^2$ -питома сила різання для Inconel 718

Аналогічним шляхом були вирахованні параметри для інших переходів. Результат наданий у Таблиці 2.5.4.

Таблиця 2.5.4 Результати розрахунку режимів різання для переходів 1–8 з урахуванням припуску

Перехід	t, хв	S, мм/об	L, мм	V, м/хв	n, об/хв	T _m , хв
1	1.5	0.06 (fz)	20	83.5	348	1.44
2	0.3	0.05 (fz)	20	59.7	597	8.38
3	0.3	0.05	2.5	6.65	133	1.50
4	0.2	0.04	11	4.52	113	12.17
5	0.5	0.07	2.5	19.6	280	0.26
6	0.3	0.05	7.5	5.95	119	5.04
7	0.2	0.03	0.6	2.07	69	1.45
8	0.2	0.04	7.5	4.88	122	7.68

2.6 Виготовлення заготовки методом адитивних технологій

Процес починається з створення цифрової 3D-моделі за допомогою програмного забезпечення CAD (Computer-Aided Design). Ця модель розбивається на тонкі шари, після чого спеціальний 3D-принтер пошарово "друкує" виріб, використовуючи енергію лазера, електронного променя або плазми для плавлення та з'єднання металевих частинок.

Основні етапи процесу:

1. Підготовка моделі: Проектування деталі та її адаптація до вимог конкретної технології друку.
2. Підготовка матеріалу: Використання металевих порошків (наприклад, титанових, алюмінієвих, сталевих сплавів) або дроту.
3. Друк: Пошарове нанесення матеріалу з одночасним сплавленням.
4. Постобробка: Видалення залишків порошку, термічна обробка, шліфування чи полірування для досягнення необхідної якості поверхні.

Для друку деталі був використаний принтер EOS M400 [13] (рис.2.3), який працює за методом Direct Metal Laser Sintering (DMLS), що в перекладі

означає "пряме лазерне спікання металу". Ця технологія належить до адитивного виробництва (3D-друку) і використовується для створення високоякісних металевих деталей.



Рис. 2.3 EOS M400

Як працює EOS M400 за методом DMLS:

1. Підготовка матеріалу: У принтері використовується металевий порошок (наприклад, алюміній, нержавіюча сталь, титан або суперсплави), який завантажується в спеціальну камеру.

2. Процес друку: Потужний лазер (у випадку EOS M400 — лазер потужністю 1000 Вт) вибірково сплавляє тонкий шар порошку відповідно до цифрової 3D-моделі. Лазер нагріває порошок до температури плавлення, з'єднуючи частинки між собою та з попереднім шаром.

3. Пошарове нанесення: Після завершення одного шару платформа опускається, наноситься новий шар порошку, і процес повторюється, доки деталь не буде повністю сформована.

4. Охолодження та обробка: Після завершення друку деталь охолоджується, а невикористаний порошок видаляється для повторного використання. Іноді потрібна додаткова постобробка, наприклад, термічна обробка чи полірування.

Особливості EOS M400:

- Об'єм друку: 400 x 400 x 400 мм, що дозволяє виготовляти великі деталі.
- Автоматизація: Принтер має високоавтоматизовані процеси, що спрощують його експлуатацію.
- Матеріали: Підтримує широкий спектр металів, від легких до надміцних сплавів.

Цей метод ідеально підходить для промислового виробництва складних металевих компонентів, наприклад, у аерокосмічній, автомобільній чи медичній галузях.

Після того, як модель заготовки була підготовлена в одній з CAD програм, її необхідно завантажити і опрацювати в спеціальній програмі для кінцевої підготовки моделі для друку. Однією з найпотужніших програм для обробки моделей, перевірки, редагування і створення підтримок є Materialise Magics [14]. Версія 25.02, випущена у 2021 році компанією *Materialise NV (Бельгія)*, є однією з найпросунутіших програмних платформ у сфері 3D-друку та виробництва на основі порошкових і полімерних технологій.

Основні функції Magics 25.02.

1. Імпорт і аналіз STL- та CAD-файлів. Програма підтримує імпорт більшості стандартних форматів (STL, AMF, 3MF, STEP, IGES, SolidWorks тощо), виконує контроль і виявлення помилок, таких як нещільності, дірки, перекручені нормалі.

2. Ремонт STL-моделей. Вбудовані інструменти дозволяють виправити дефекти сітки — зшивання отворів, з'єднання поверхонь, видалення незначних артефактів.

3. Орієнтація та розміщення на платформі. Автоматична й ручна оптимізація орієнтації моделі на друкарському столі для зменшення часу друку, кількості підтримок і деформацій.

4. Генерація підтримок. У Magics 25.02 реалізовано кілька типів підтримок (точкові, лінійні, деревоподібні), з урахуванням матеріалу та технології друку.

5. Заповнення (Lattice Structures). Створення легких решітчастих структур всередині моделі з метою зменшення маси, вартості матеріалу та збереження міцності.

6. Перевірка та симуляція друку. Аналіз термічних деформацій, зон з високим ризиком помилок та попередження про проблеми перед друком.

7. Підтримка пакетної підготовки. Можливість одночасної обробки великої кількості моделей, що особливо актуально у серійному виробництві.

Для початку необхідно визначитися з напрямком 3D друку, для отримання деталі високої якості та мінімізації кількості підтримок. Напрямок друку відображен на рис. 2.4.

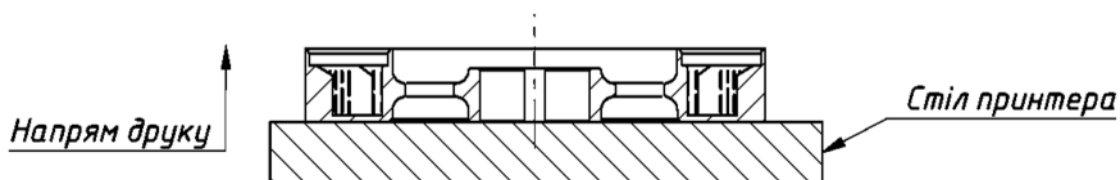


Рис. 2.4 Схема і напрям друку деталі «Ступиця»

Таке положення деталі на столі принтера і напрям друку дозволяють надрукувати деталь без внутрішніх підтримок, що значно полегшить пост обробку деталі після друку, підвищить якість деталі та мінімізує час виготовлення. На рис.2.5-2.7 наданий результат моделювання підтримок в програмі Magics 25.02.

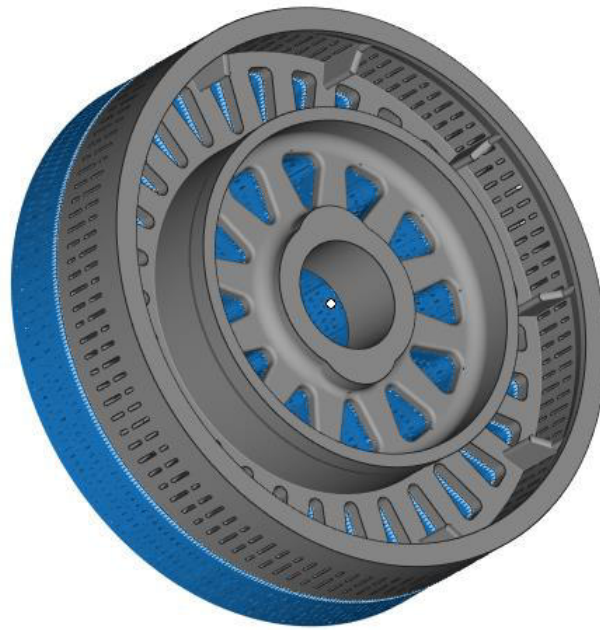


Рис. 2.5 Деталь і підтримки в програмі Magics

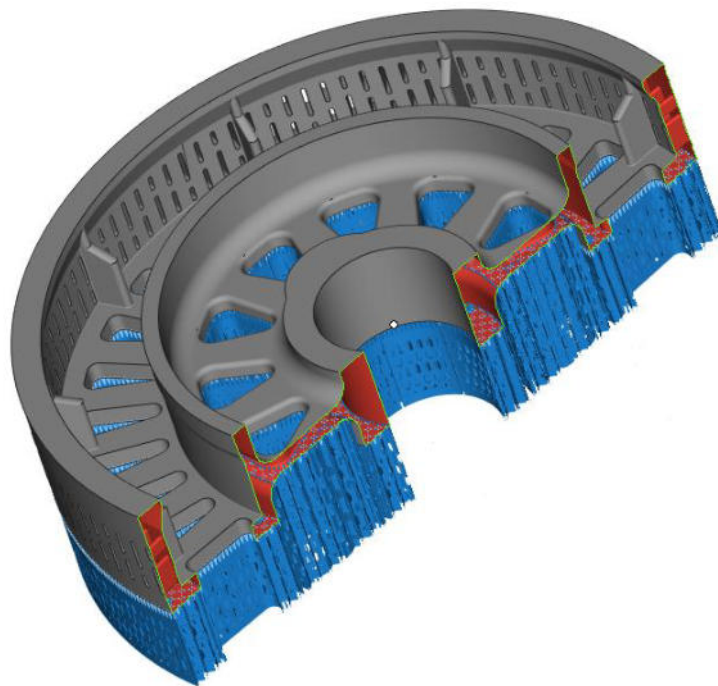


Рис. 2.6 Деталь і підтримки в програмі Magics

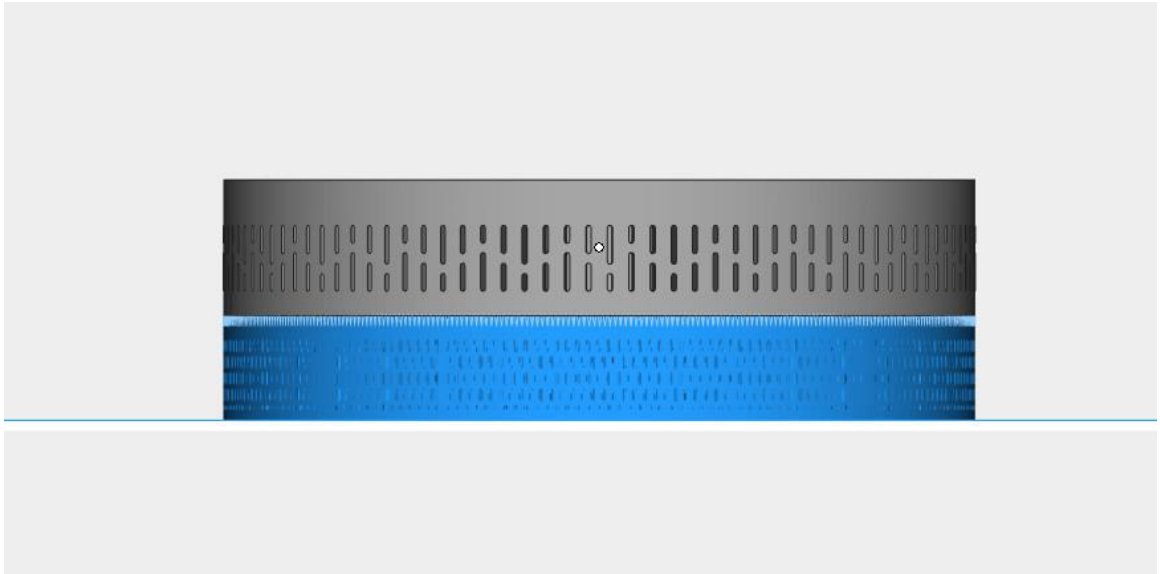


Рис. 2.7 Деталь і підтримки в програмі Magics

З рисунків ми бачимо, що підтримки, які відображені синім кольором необхідні лише з нижньої сторони і виконують роль буфера між столом принтера та деталлю. Завдяки тому, що вони знаходяться з зовнішньої сторони деталі де не складна геометрія і немає точних розмірів процес їх видалення після 3D друку є відносно легкою операцією. Також завдяки мінімізації підтримок – мінімізується кількість порошка Inconel 718, що позитивно впливає на вартість деталі.

3. СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

3.1 Реалізація генератора випадкових чисел за нормальним розподілом у середовищі LabVIEW для програми імітаційно-статистичного моделювання контрольовано-вимірювальних систем

"Ich behaupte aber, daß in jeder besonderen Naturlehre nur so viel eigentliche Wissenschaft angetroffen werden könne, als darin Mathematik anzutreffen ist."

– I. Kant

"Я стверджую, однак, що в кожному конкретному вченні про природу можна знайти лише стільки справжньої науки, скільки в ній є математики" – I. Кант

Математичне моделювання дозволяє описати реальні процеси, об'єкти та проблеми за допомогою математичних моделей, і знайти вирішення різноманітних питань за допомогою математичних інструментів. Однією з таких актуальних проблем є адекватний вибір вимірювального інструменту і методу вимірювання для механічних деталей на виробництві. Невпинний розвиток технологій дозволив досягнути величезного прогресу у створенні сучасних методів та інструментів вимірювання з високою точністю[15-17]. Однак не завжди доцільно у виробництві використовувати інструменти з надмірною точністю вимірювання, оскільки це може призвести до зниження продуктивності виробництва і підвищення вартості продукції, що матиме негативний економічний вплив для підприємства. Проблему адекватного вибору вимірювального інструменту для кожного конкретного випадку дозволяє вирішити математичне моделювання. Так у [18, 19] автори для вирішення проблеми неправильно забракованих і неправильно прийнятих деталей пропонують використовувати метод імітаційно-статистичного моделювання у поєднанні з методом Монте-Карло, суть якого полягає у використанні математичної моделі з генератором випадкових чисел. У якості середовища моделювання автори використовують програму NI LabVIEW. Представлена математична модель дозволила

отримати розрахунки з високою точністю і допомогла зробити раціональний вибір необхідної мінімальної точності вимірювального процесу.

Виходячи з результатів робіт [18, 19] запропоновано вдосконалення наданої математичної моделі, шляхом заміни використаного генератора випадкових чисел з рівномірним розподілом, на генератор випадкових чисел з нормальним розподілом, оскільки саме він більше відповідає природі виготовлення деталей на виробництві. Для реалізації генератора випадкових чисел за нормальним розподілом було використано перетворення Бокса-Мюлера [20] та полярний метод розроблений Д. Марсалія та Т.А.Бреєм [21]. Дані перетворення є точними методами моделювання стандартних нормально розподілених випадкових чисел.

Перший метод, запропонований Д. Боксом та М. Мюллером полягає у генерації за рівномірним законом двох випадкових, незалежних чисел r та φ в інтервалі від 0 до 1. Потім за допомогою математичних перетворень (3.1) та (3.2) отримуємо два випадкових незалежних числа z_0 та z_1 але вже розподілених за нормальним законом з математичним сподіванням 0 та дисперсією 1.

$$z_0 = \cos(2\pi\varphi)\sqrt{-2\ln r} \quad (3.1)$$

$$z_1 = \sin(2\pi\varphi)\sqrt{-2\ln r} \quad (3.2)$$

Для реалізації другого методу, як і у попередньому методі, необхідно згенерувати за рівномірним розподілом два випадкових, незалежних числа u_1 та u_2 , але в інтервалі від -1 до 1. Згенеровані дані повинні задовольняти наступні вимоги:

$$\begin{cases} R = u_1^2 + u_2^2 \\ 0 < R \leq 1 \end{cases} \quad (3.3)$$

Якщо вимога (3.3) не виконується, то необхідно викинути не відповідну пару u_1 та u_2 та згенерувати заново. На основі вірно згенерованих u_1 та u_2 отримати значення z_0 та z_1 за допомогою (3.1) та (3.2):

$$z_0 = u_1 \cdot \sqrt{\frac{-2 \ln R}{R}} \quad (3.4)$$

$$z_1 = u_2 \cdot \sqrt{\frac{-2 \ln R}{R}} \quad (3.5)$$

Необхідно врахувати коефіцієнт базових випадкових величин, що дорівнює $\frac{\pi}{4} \approx 0,785$.

Щоб перейти від величин z_0 та z_1 до необхідних випадкових чисел X_i з заданим математичним очікуванням μ та стандартним відхиленням σ у обох випадках використовуємо наступний вираз:

$$X_i = \mu + \sigma z_i \quad (3.6)$$

де i – порядковий номер змінної.

На основі обох методів були створені генератори випадкових чисел за нормальним розподілом у програмі NI LabView. Результат моделювання для варіанту з кількістю випадкових значень 5000, $\mu = 0$ та $\sigma = 5$ наведений нижче.

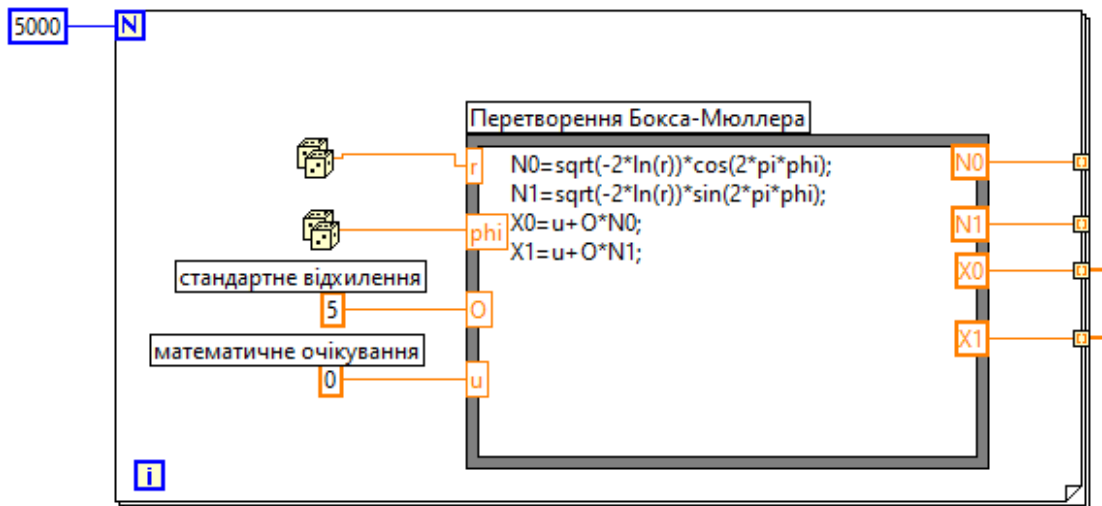


Рис. 3.1. Програмний код генератора випадкових чисел за нормальним розподілом, перетворення Бокса-Мюллера.

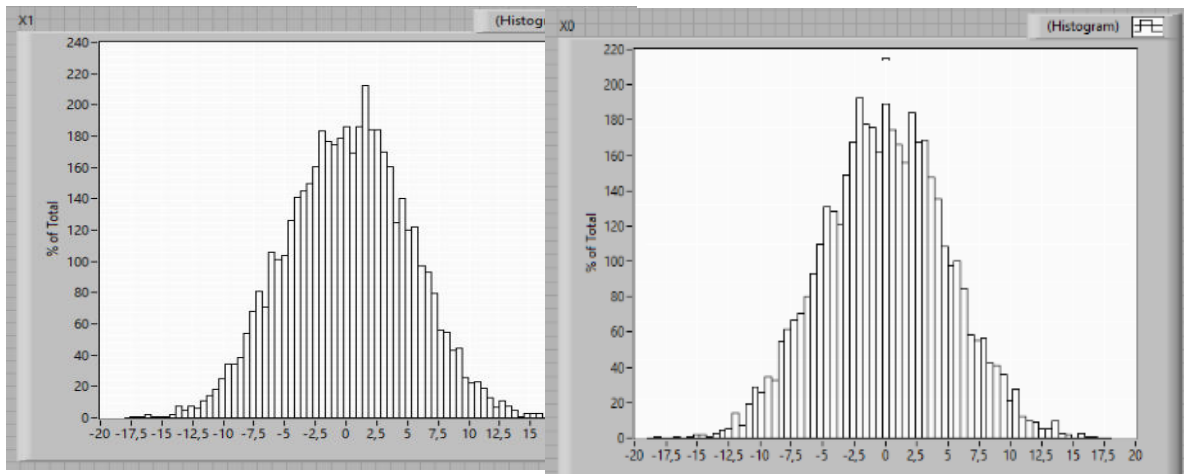


Рис. 3.2. Гістограми розподілу значень X_0 та X_1 згенерованих за допомогою перетворення Бокса-Мюллера

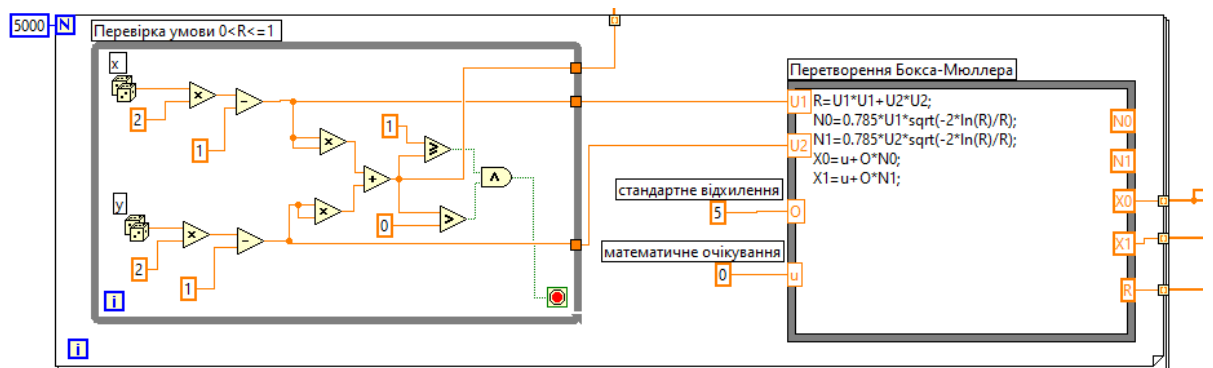


Рис. 3.3. Програмний код генератора випадкових чисел за нормальним розподілом, перетворення Д. Марсалія та Т.А.Бреєм.

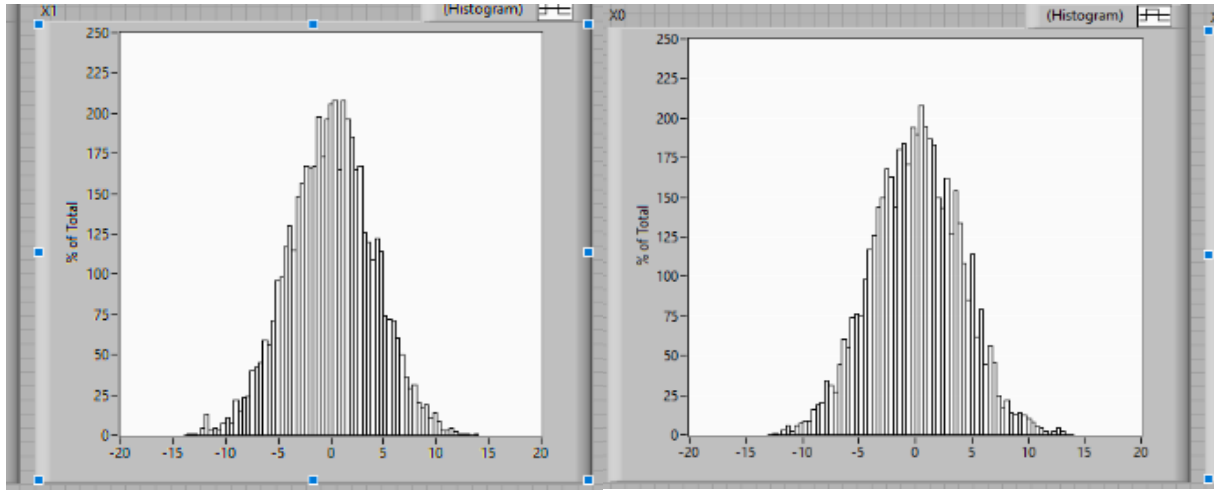


Рис. 3.4. Гістограми розподілу значень X_0 та X_1 згенерованих за допомогою перетворення Д. Марсалія та Т.А.Бреєм.

Проаналізувавши отримані розподіли для обох методів, були отримані значення математичного очікування і стандартного розподілу. Результати надані в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Характеристики методів перетворення.

	Перетворення Бокса-Мюлера	Полярний метод
Математичне очікування, μ	0	0
Середньоквадратичне відхилення, σ	4	5

Наведені методи реалізації генераторів випадкових чисел за нормальним розподілом у середовищі NI LabVIEW дозволяють покращити існуючі математичні моделі процесу вимірювання та бракування деталей, що в свою чергу призведе до підвищення продуктивності виробництва деталей та знизити їх собівартість.

Більш практичним методом вважається полярний метод перетворення запропонований Д. Марсалія та Т.А.Бреєм тому, що при перетворенні

використовується лише одна трансцендентна функція, що робить розрахунки більш швидкими. Хоча, як можна бачити з отриманих гістограм розподілу та таблиці 1, метод перетворення Бокса-Мюллера дає можливість отримати більш широкий нормальний розподіл, з дещо більшим стандартним відхиленням.

Представлені методи реалізації генераторів випадкових є універсальними і можуть бути застосовуваними для вирішення інших задач та у інших програмних середовищах.

На основі [18,19] та запропонованого генератора випадкових чисел була відтворена вдосконалена програма моделювання. Окрім нового генератора випадкових чисел програма отримала власний інтерфейс користувача.

При моделюванні важливо адекватно вказати точність інструменту вимірювання, що можливо знайти в паспортних даних інструменту, а також визначення коефіцієнта точності технології.

Коефіцієнт точності технології (K_t) — це показник, який відображає, наскільки технологічний процес здатний забезпечити задану точність виготовлення деталі. Він використовується в машинобудуванні для оцінки відповідності технологічного процесу вимогам точності, заданим у кресленні (допуски на розміри, форму, розташування тощо). Давайте розберемо це детальніше.

Коефіцієнт точності технології зазвичай розраховується як відношення допуску на розмір (або інший параметр), заданого в кресленні, до розкиду розмірів, який забезпечує технологічний процес:

$$K_t = \frac{\Delta}{S r_{\text{розкид}}} \quad (3.7)$$

де:

- Δ — допуск на розмір (мм), визначений у кресленні;

- $Sr_{\text{розкид}}$ — розкид розмірів (мм), який забезпечує технологічний процес (визначається експериментально або теоретично через похибки верстата, інструменту, припусків тощо).

Інтерпретація K_t :

- $K_t > 1$: Технологічний процес забезпечує точність, вищу за необхідну (розкид $Sr_{\text{розкид}}$ менший за допуск Δ). Це свідчить про високу точність процесу.
- $K_t = 1$: Розкид процесу точно відповідає допуску, тобто процес на межі забезпечення точності.
- $K_t < 1$: Технологічний процес не забезпечує необхідну точність (розкид $Sr_{\text{розкид}}$ більший за допуск Δ), що може призвести до браку.

Визначмо допуск Δ для $\text{Ø}44.4 f7$, де

- Позначення $f7$ — посадка з зазором, квалітет 7
- Згідно зі стандартом ISO (або ГОСТ 25347-82), для діаметра 44.4 мм із квалітетом 7:
 - Номінальний розмір: 44.4 мм,
 - Верхнє відхилення (ES): -25 мкм (-0.025 мм),
 - Нижнє відхилення (EI): -50 мкм (-0.050 мм).
- Допуск:
 - $\Delta = ES - EI = -0.025 - (-0.050) = 0.025\text{мм}$ (3.8)

Визначмо розкид процесу $Sr_{\text{розкид}}$

Розкид $Sr_{\text{розкид}}$ залежить від точності верстата, інструменту, припусків і технологічного процесу. У вашому випадку:

- Верстат DMG Mori CMX 70 U — сучасний п'ятиосьовий верстат із ЧПК, який має високу точність (похибка позиціонування зазвичай 0.005–0.010 мм).
- Інструмент: CoroTurn 107 із полірованою пластиною, що забезпечує високу якість поверхні.
- Параметри точіння $S = 0.07$ мм/об, $t = 0.5$ мм, $V_c = 40$ м/хв Припустимо, що технологічний процес (верстат + інструмент + режими) забезпечує розкид розмірів $Sr_{\text{розкид}} = 0.012$ мм (типове значення для чистового точіння на ЧПК-верстаті з такими параметрами).

Розрахунок K_t по формулі 3.7:

$$K_t = \frac{0.025}{0.012} = 2,08$$

Тому прийmemo, що коефіцієнт точності технології для діаметру 44.4f7 дорівнює 2, а похибка вимірювання інструменту 4мкм. Результат моделювання наданий на рис.3.5-3.7.

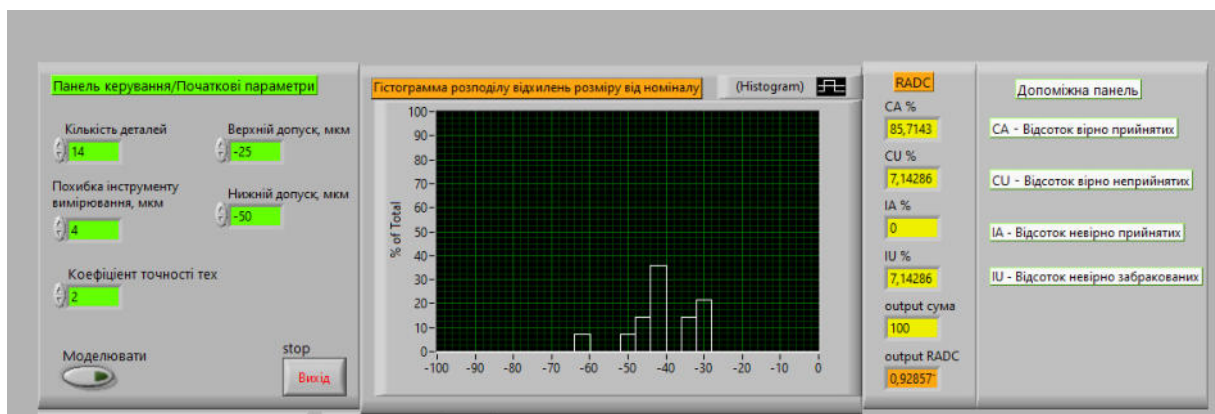


Рис. 3.5. Результат моделювання №1 для коефіцієнта точності 2

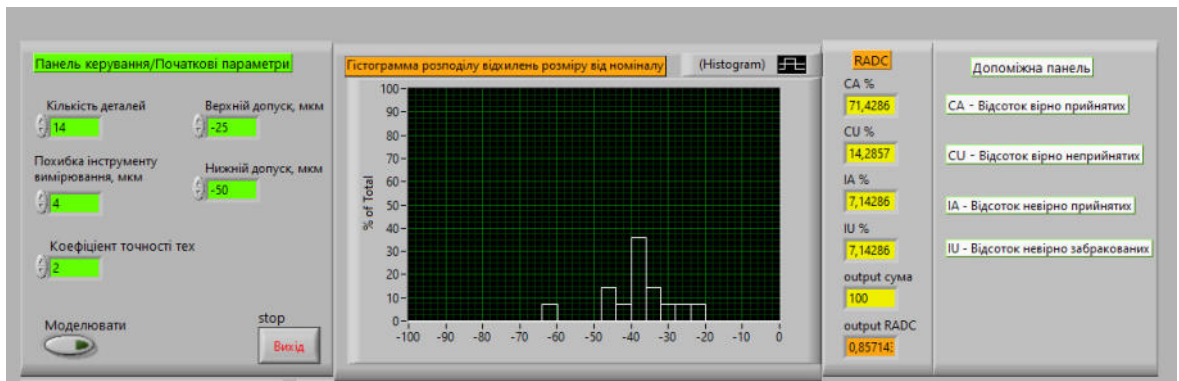


Рис. 3.6. Результат моделювання №2 для коефіцієнта точності 2

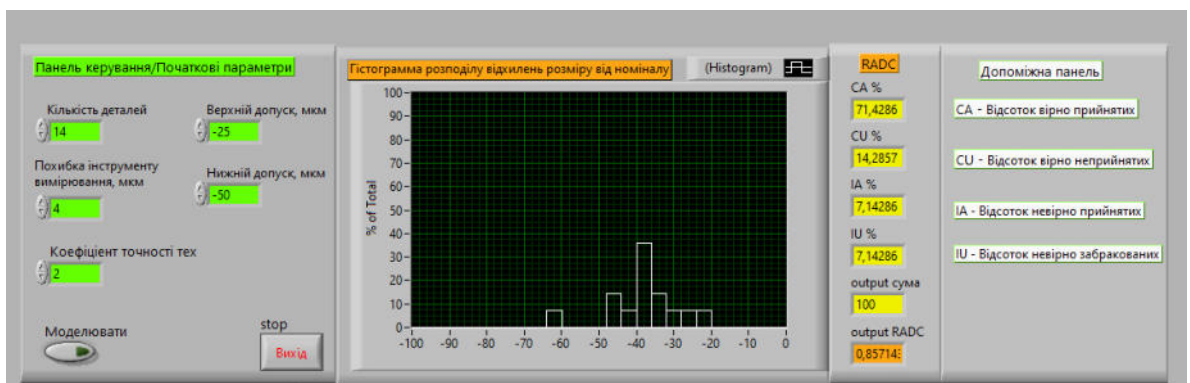


Рис. 3.7. Результат моделювання №3 для коефіцієнта точності 2

Для порівняння було проведено моделювання (рис.3.8-3.10) при коефіцієнті технології 4, що повинно відповідати кращому результату.

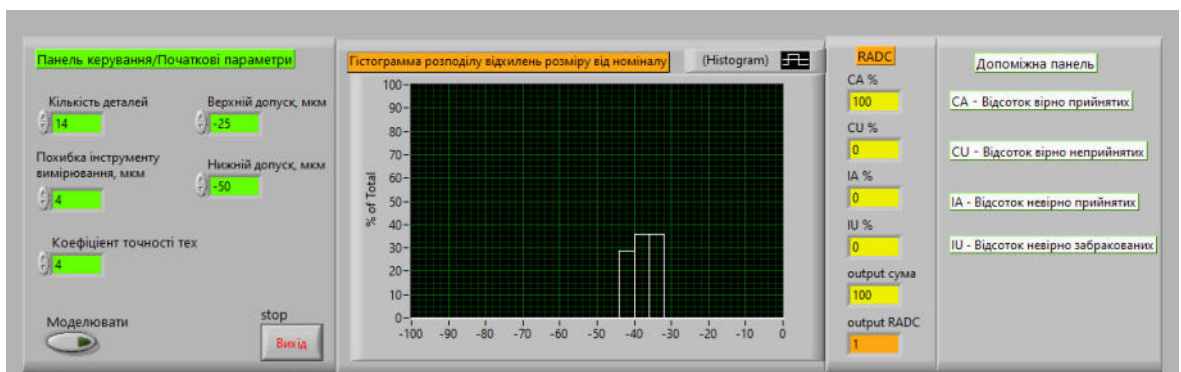


Рис. 3.8. Результат моделювання №1 для коефіцієнта точності 4

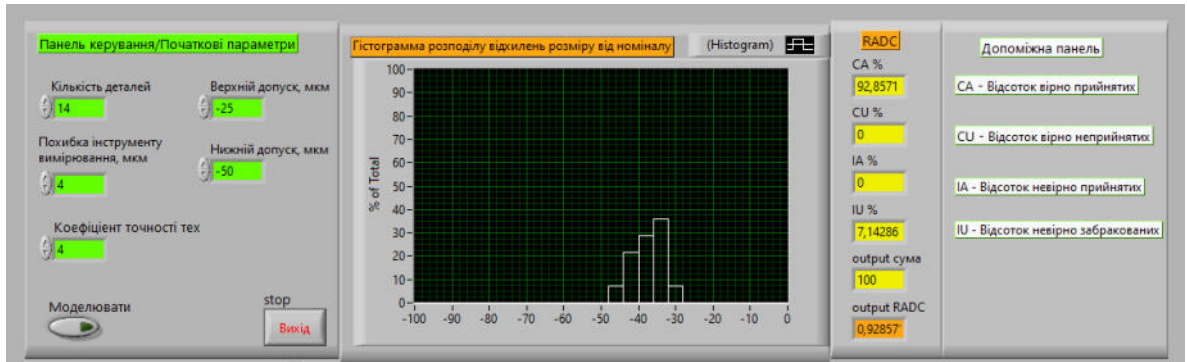


Рис. 3.9. Результат моделювання №2 для коефіцієнта точності 4

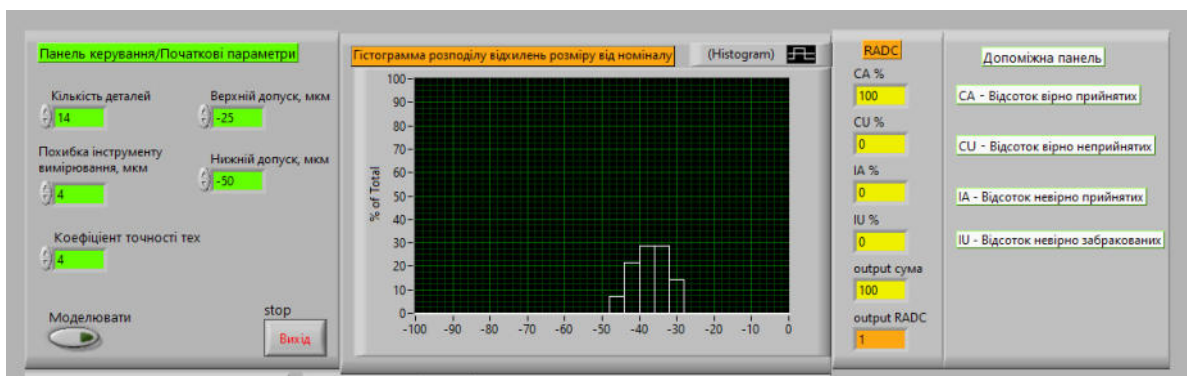


Рис. 3.10. Результат моделювання №3 для коефіцієнта точності 4

І для коефіцієнта технології 1 (рис. 3.11-3.13), що відповідає великому відсотку браку.

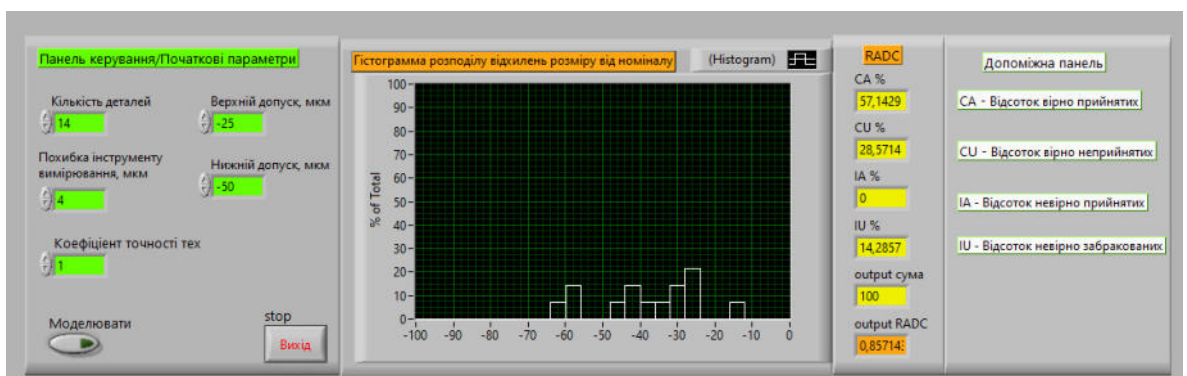


Рис. 3.11. Результат моделювання №1 для коефіцієнта точності 1

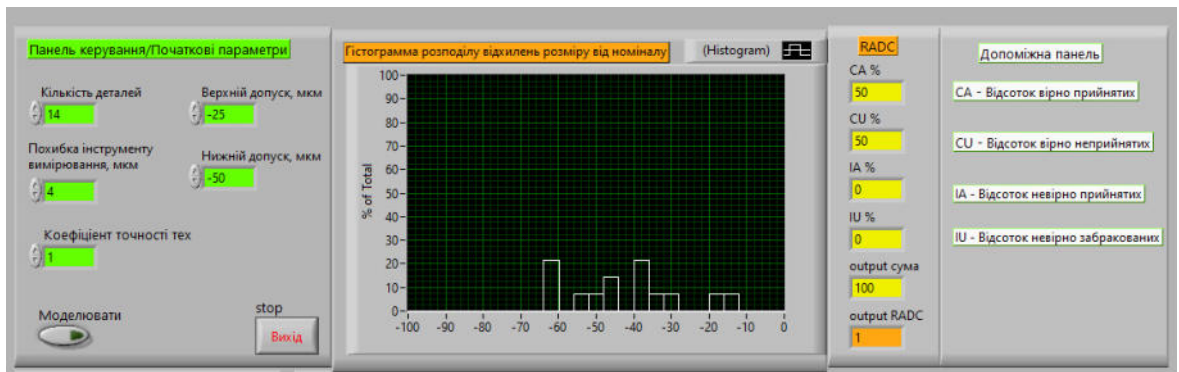


Рис. 3.12. Результат моделювання №2 для коефіцієнта точності 1

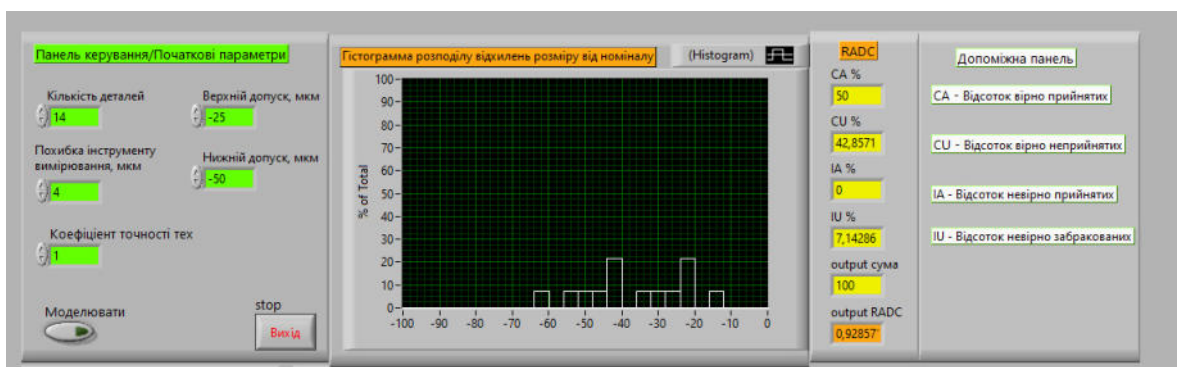


Рис. 3.13. Результат моделювання №3 для коефіцієнта точності 1

Яким можна бачити, результат відповідає очікуванням. При зміні коефіцієнта на 4, ми отримуємо 90-100% гідних деталей, а при зменшенні коефіцієнта до 1, навпаки, відсоток вірно прийнятих деталей падає до 50-60%. Цей результат є додатковим підтвердженням адекватності моделі.

4. НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

4.1 Дослідження та розрахунок запасу несучої здатності деталі «Ступиця» у складі ротора

Деталі, які використовуються в аерокосмічній техніці зазвичай мають відносно невеликий запас міцності і працюють близько до межі працездатності. Тому при проектуванні таких деталей приділяють велике значення розрахунку на міцність та граничним режимам роботи.

Для деталі «Ступиця», яка є об'єктом даної дипломної роботи доцільно проводити розрахунки на міцність у складі складальної одиниці ротор, щоб отримати результат максимально наближений до практики. При обертанні на деталь ступиця найбільше навантаження надає відцентрована сила постійних магнітів. Розрахунок проводився в спеціальній програмі для розрахунку міцності, яка працює на методі кінцевих елементів (FEM- Finite Element Method). Дана програма відрізняється високою точністю розрахунків і зарекомендувала себе як надійний інструмент.

Розглянуто конструкцію ротора електрогенератора. Для розрахунку на міцність було взято 1/6 частину конструкції (сектор 60°). Ротор навантажений відцентровою силою від обертання з кутовою швидкістю 50000 об/хв. Розрахункова модель наведена на рисунку 4.1 . Матеріал конструкції – Inconel 718 загартований, механічні властивості якого наведені в таблиці 4.1. Результати розрахунку наведені на рисунках 4.2, 4.3 та таблиці 4.2.

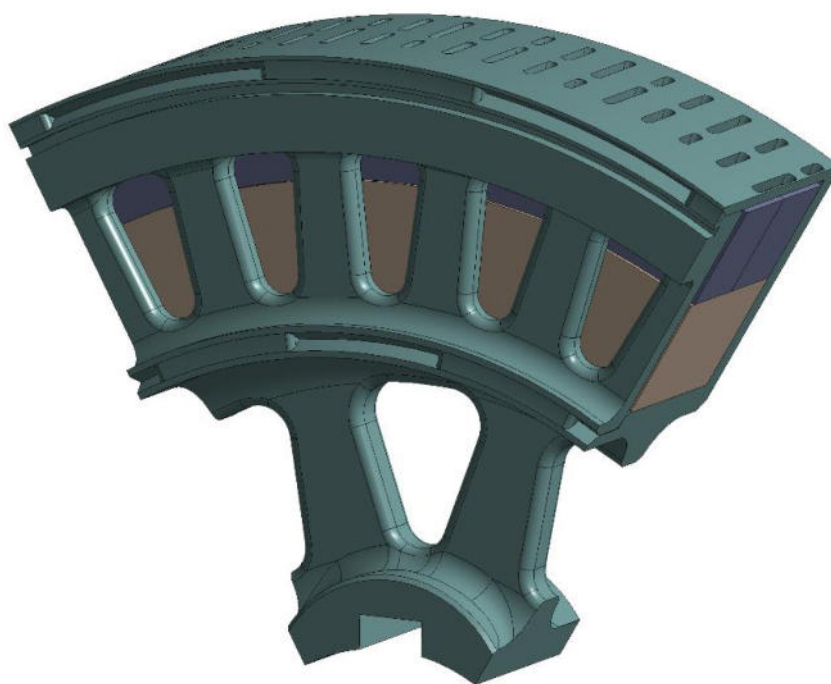


Рис. 4.1. Розрахункова модель ротора електрогенератора

Таблиця 4.1 – Механічні властивості металу Inconel 718

t, K (°C)	E, МПа	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %
293 (20)	165000	889	511	45

E – модуль пружності;

σ_B – тимчасовий опір;

σ_T – межа текучості;

δ – граничне відносне подовження.

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

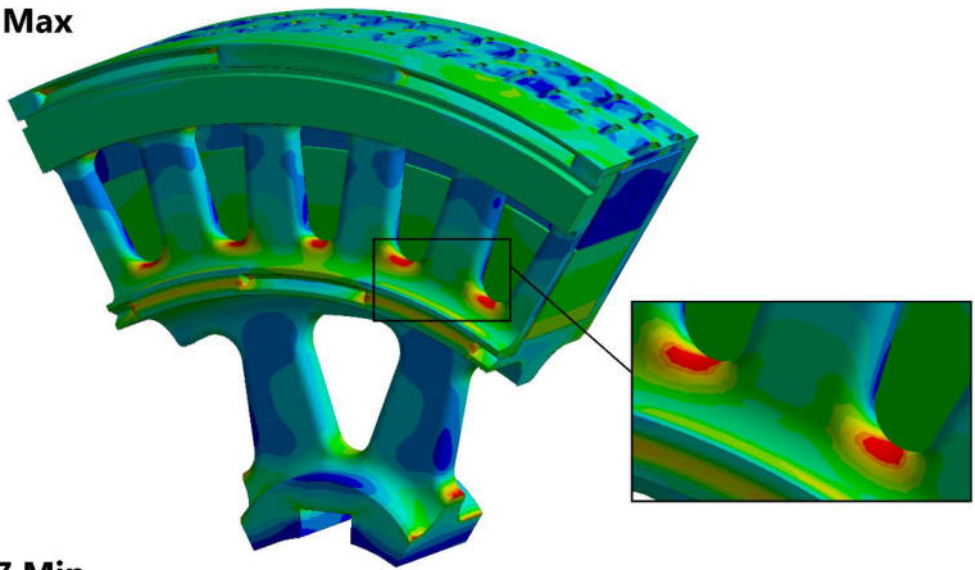
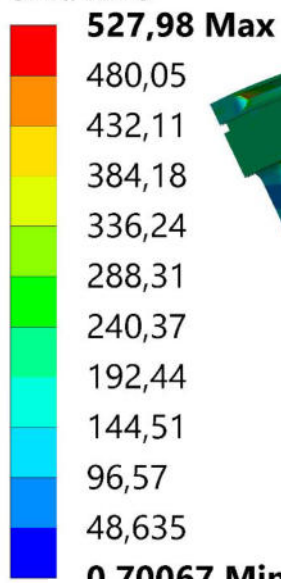


Рис. 4.2. Еквівалентна напруга в конструкції

Type: Directional Deformation(X Axis)

Unit: mm

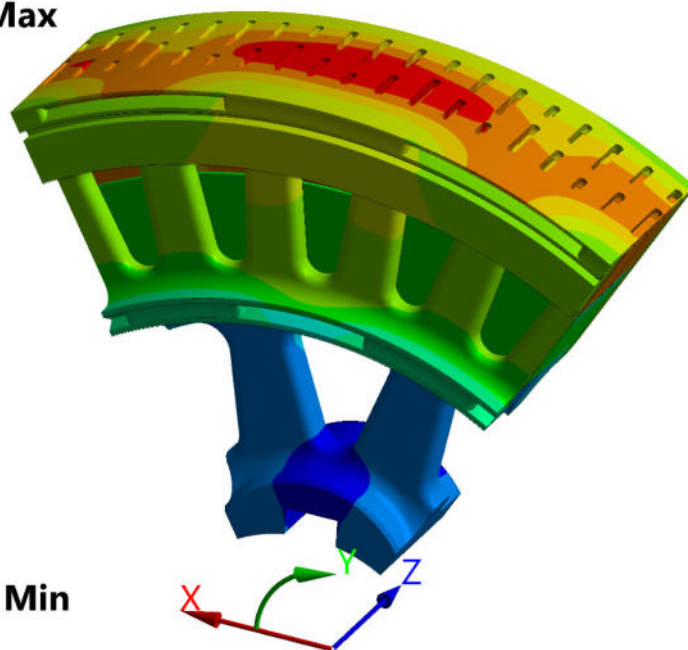
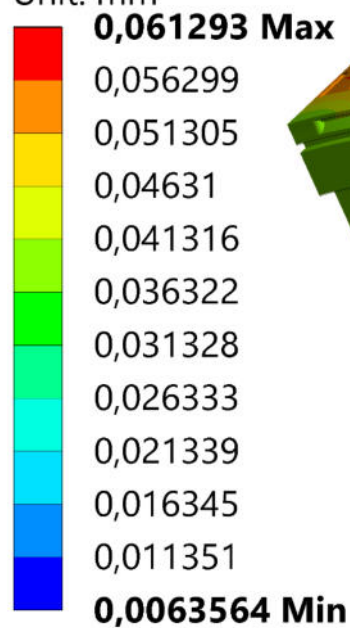


Рис. 4.3. Радіальні деформації у конструкції

Таблиця 4.2 - Результати розрахунку ротора електромагніту при частоті обертання 50000 об/хв

Деталь	σ_{\max} , МПа	n_B	$[n_B]$	ϵ_{pl} , %	$[\epsilon_B]$, %
Деталі з лаву Inconel 718	480	1.85	1.5	0.6	45

σ_{\max} – максимальні розрахункові еквівалентні напруження;

n_B – розрахунковий запас міцності;

$[n_B]$ – допустимий запас міцності (згідно з нормами міцності);

ϵ_{pl} – розрахункове значення пластичних відносних деформацій;

$[\epsilon_B]$ – граничне значення пластичних відносних деформацій (згідно з довідковими даними на конкретний матеріал).

Як видно з таблиці 4.2, запаси міцності елементів конструкції задовольняють вимогам норм міцності. Додатково виконано розрахунок на несучу здатність ротора електромагніта. Частота обертання, відповідна втраті несучої здатності (руйнування ротора), склала 78285 об/хв. Результати розрахунку на несучу здатність наведено на рисунках 4.4, 4.5.

Type: Equivalent (von-Mises) Stress

Unit: MPa

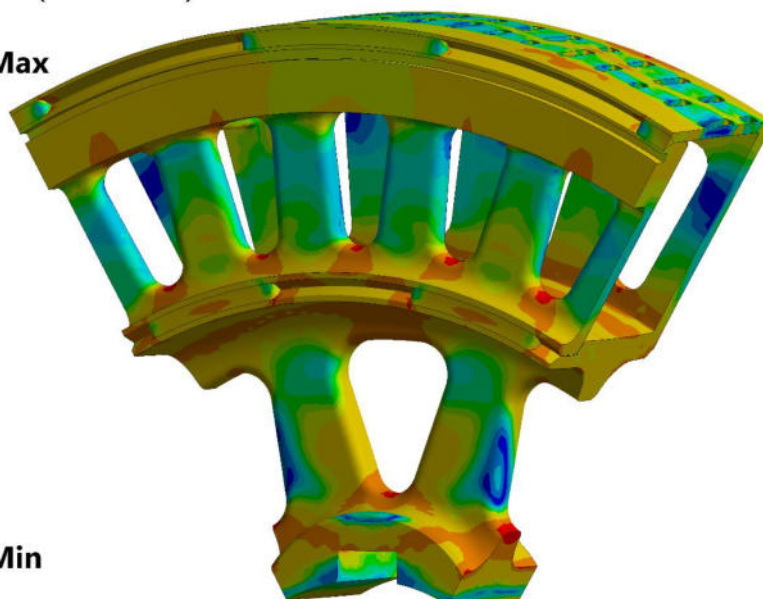
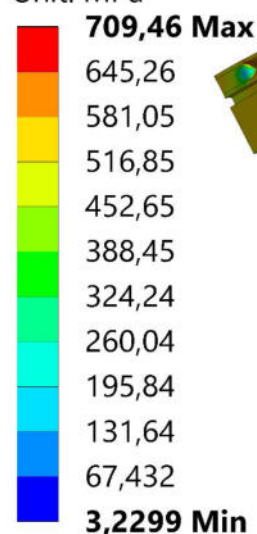


Рис. 4.4. Еквівалентна напруга в конструкції при частоті обертання 78285 об/хв

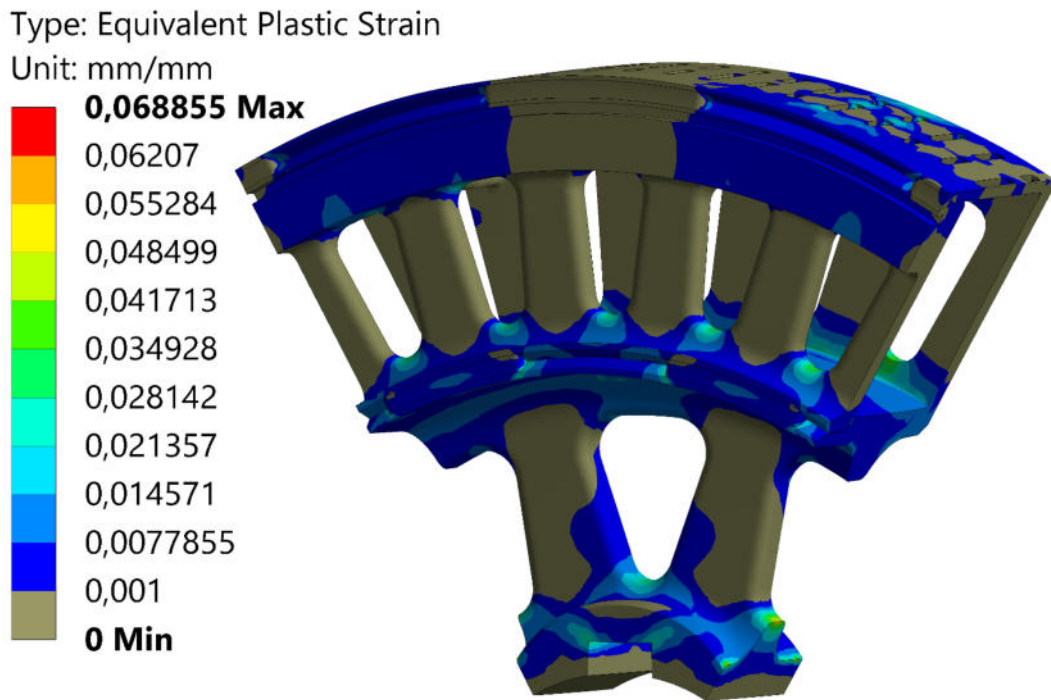


Рис. 4.5. Пластичні відносні деформації при частоті обертання
78285 об/хв

Результати розрахунку показали, що конструкція має запас несучої здатності $n_{\text{нес}} = 78285/50000 = 1.57$, що відповідає нормам міцності.

Було проведено оцінку міцності ротора електромагніту без використання епоксидного клею між магнітом та деталлю «Ступиця». Частота обертання, що відповідає втрати несучої здатності (руйнування ротора), склала 47900 об/хв. Результати розрахунку наведено на рисунках 4.6 – 4.7.

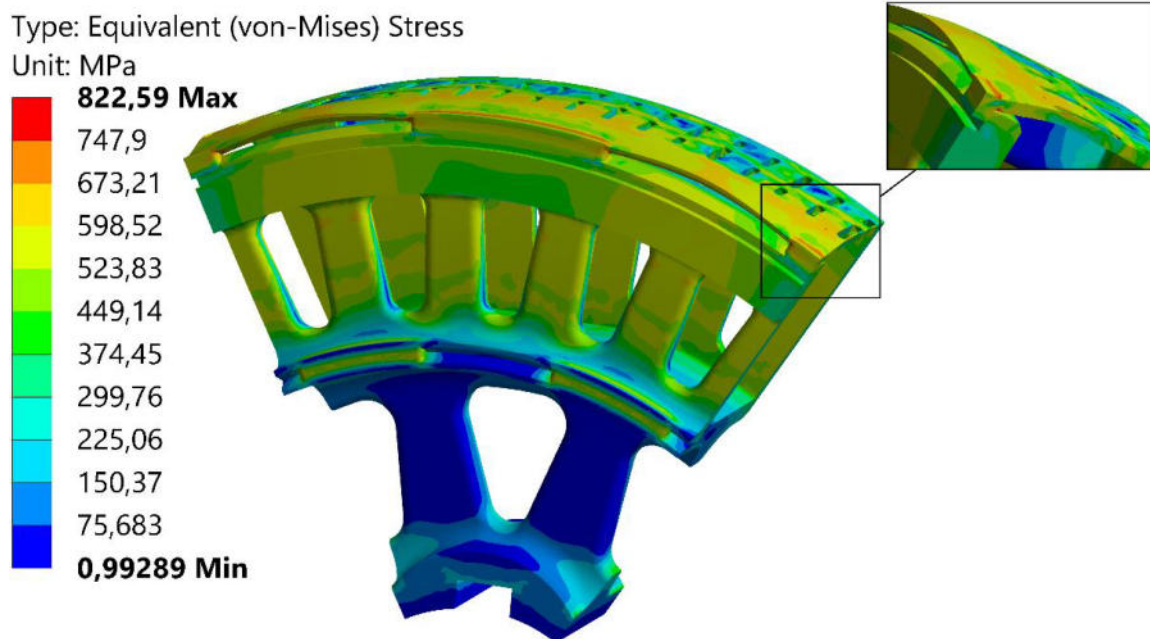


Рис. 4.6. Еквівалентна напруга у конструкції при частоті обертання 47900 об/хв

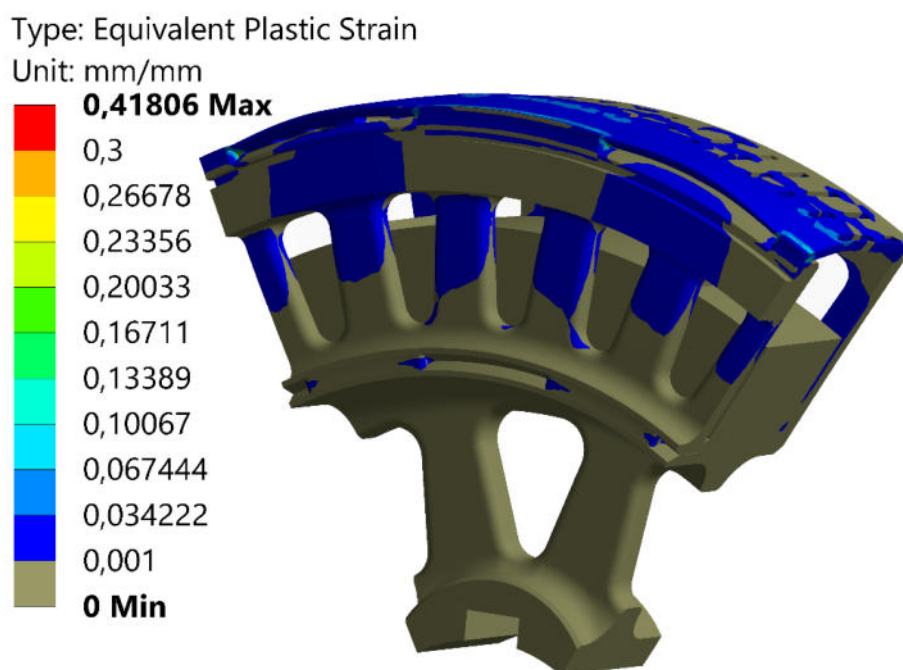


Рис. 4.7. Пластичні відносні деформації у конструкції при частоті обертання 47900 об/хв.

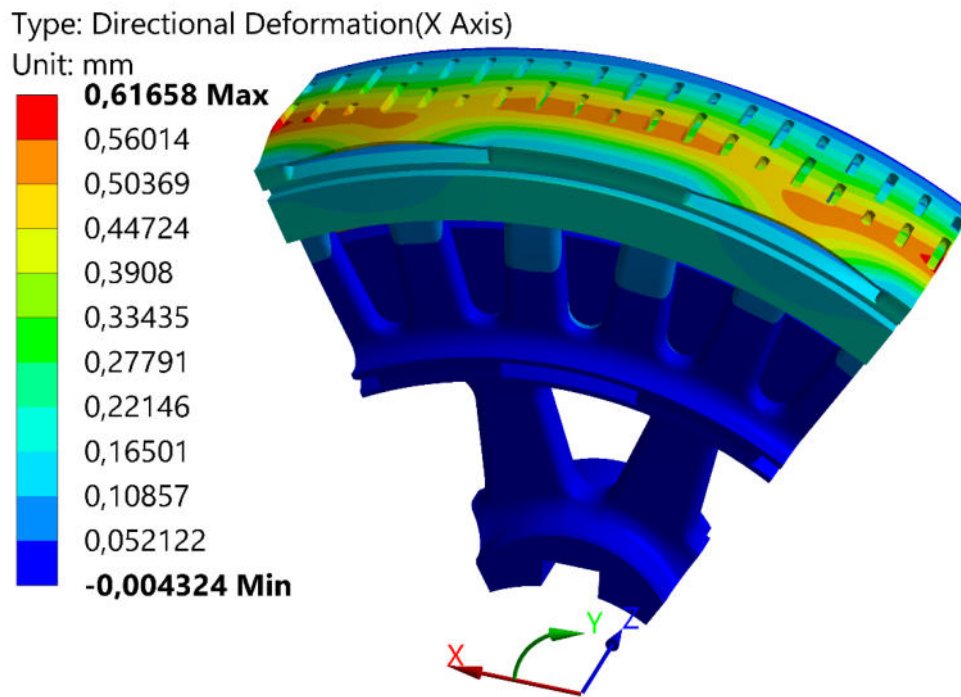


Рис. 4.8. Радіальні деформації у конструкції при частоті обертання 47900 про/хв

Результати розрахунку показали, що конструкція має запас несучої здатності $n_{нес} = 47900/50000 = 0.958$. Таким чином можемо зробити висновок, що наявність епоксидного клею в конструкції ротора між магнітом та поверхньою деталі «Ступиця» є необхідним.

ВИСНОВКИ

У ході виконання роботи було встановлено, що адитивні технології у поєднанні з подальшою постмеханічною обробкою дозволяють усунути технологічні обмеження при виготовленні деталей, а також знизити собівартість продукції у випадку виготовлення невеликих партій або складних конструкцій. Це особливо актуально для аерокосмічної галузі.

Обґрунтовано вибір матеріалу для деталі «Ступиця» — найбільш доцільним виявився жароміцний сплав Inconel 718. Розроблено конструкторську документацію для виготовлення цієї деталі із застосуванням адитивних технологій та подальшої механічної обробки. Сформовано технологічний процес виготовлення деталі «Ступиця» — від заготовки до готового виробу, що підтверджує життєздатність обраної технології виробництва.

Для аналізу процесу виготовлення та забезпечення адекватного вибору засобів вимірювання була вдосконалена наявна програма моделювання шляхом реалізації математичної моделі генератора випадкових чисел з нормальним розподілом. Реалізовані в середовищі NI LabVIEW методи генерації дозволили поліпшити існуючі математичні моделі процесів вимірювання та бракування, що, у свою чергу, може сприяти підвищенню ефективності виробництва та зниженню собівартості деталей.

Також було проведено розрахунок запасу несучої здатності деталі «Ступиця» у складі ротора електрогенератора. Встановлено, що за умови використання епоксидного компаунда у конструкції, ротор має достатній запас міцності для безпечної експлуатації.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Gibson I., Rosen D.W., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies. Springer, 2021. 484 p.
2. Gu D. Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials. Springer, 2015. 311 p.
3. Special Metals Corporation. INCONEL® alloy 718. Technical Bulletin. – New York: Special Metals, 2010. – 28 p. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу:<https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-718.pdf>
4. SAE International. AMS 5664: Nickel Alloy, Corrosion and Heat Resistant, Bars, Forgings, and Rings 52.5Ni - 19.0Cr - 3.0Mo - 5.1Cb (Nb) - 0.9Ti - 0.5Al - 18Fe Vacuum Induction Plus Consumable Electrode Remelted Solution and Precipitation Heat Treated. – Warrendale, PA: SAE International, 2015. – 12 p.
5. Frazier W.E. Metal Additive Manufacturing: A Review // Journal of Materials Engineering and Performance. 2014. Vol. 23, № 6. P. 1917–1928.
6. Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. Additive manufacturing of metals // Acta Materialia. 2016. Vol. 117. P. 371–392.
7. DebRoy T., Wei H., Zuback J.S., Mukherjee T., Elmer J.W., Milewski J.O., Beese A.M., Wilson-Heid A., De A., Zhang W. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties // Progress in Materials Science. 2018. Vol. 92. P. 112–224.
8. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges // Composites Part B: Engineering. 2018. Vol. 143. P. 172–196.

9. Mitsubishi Electric. Wire-cut EDM MV2400S NewGen. – Tokyo: Mitsubishi Electric Corp., 2020. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mitsubishielectric.com/fa/products/edm/lineup/mv2400s/>
10. Sandvik Coromant. Product catalog 2023. – Sandviken, Sweden: Sandvik AB, 2023.
11. Haimer GmbH. Tool Management. – Igenhausen: Haimer GmbH, 2023. – 12 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://haimer.com/shop/catalog/downloads/files/22_09_Flyer_Tool_Management_DE_EN_screen/2023-02-Tool-Management-web.pdf
12. DMG MORI. CMX 70 U – 5-Axis Milling Machine. – Tokyo: DMG MORI CO., LTD., 2023. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://en.dmgmori.com/products/machines/milling/5-axis-milling/cmх-u/cmх-70-u>
13. EOS GmbH. EOS M400 System Description. – Krailing, Germany: EOS GmbH, 2021. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.eos.info/metal-solutions/metal-printers/data-sheets/sds-eos-m-400>
14. Materialise NV. Materialise Magics 25.02. – Leuven, Belgium: Materialise, 2021. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.materialise.com/en/software/magics>
15. Śladkowski A., Proydak Yu., Ruban V. Increasing the resource of milling cutters used to process the locomotive wheelsets. Part 1: Determination of cutting forces // Transport Problems. – 2018. – Vol. 13, Issue 3. – P. 119–130.
16. Śladkowski A., Proydak Yu., Ruban V. Increasing the resource of milling cutters used to process the locomotive wheelsets. Part 2: Study of stressed-deformed state // Transport Problems. – 2020. – Vol. 15, Issue 3. – P. 139–151.
17. Пацера С.Т., Корсун В.І., Дербаба В.А., Ружин П.О. Алгоритми імітаційно-статистичного дослідження контрольної-вимірювальної системи

та його програмна реалізація у NI LabView // Системи обробки інформації. – 2016. – Вип. 6. – С. 116–119.

18. Voichyshen O., Patsera S., Derbaba V. Reliability assessment dimensional control details of vehicles depending on the accuracy tool // Transport Problems International Scientific Conference & Symposium. – Katowice – Silesia: Politechnika Śląska, 21–23 June 2023.

19. Перетворення Бокса–Мюллера // Вікіпедія: вільна енциклопедія. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Перетворення_Бокса-Мюллера

20. Polar-Methode // Wikipedia: die freie Enzyklopädie. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://de.wikipedia.org/wiki/Polar-Methode>

21. Довідник користувача ЄКТС [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kpi.ua/files/ECTS.pdf> (дата звернення: 04.11.2017).

22. ДСТУ 3008:2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення.

23. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання.

24. ДСТУ 3.1105-2011. Єдина система технологічної документації. Форми та правила оформлення документів загального призначення.

25. ДСТУ 2.104-2006. Єдина система конструкторської документації. Основні написи.

26. ДСТУ 3.1102:2014. Єдина система технологічної документації. Стадії розробки та види документів. Загальні положення.

27. ДСТУ 3.1404-86. Єдина система технологічної документації. Форми і правила оформлення документів на технологічні процеси і операції обробки різанням.

28. Освітньо-наукова програма вищої освіти для магістра спеціальності 131 Прикладна механіка / С.Т. Пацера, В.А. Дербaba, С.В.

Алексєєнко; Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Д. : НТУ «ДП», 2024. – 25 с.

29. Лукинюк М.В. Автоматизація типових технологічних процесів: технологічні об'єкти керування та схеми автоматизації : навч. посіб. – Київ : НТУУ «КПІ», 2008.