

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«Харківський політехнічний інститут»

Я. М. Гаращенко

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ
ПІДГОТОВКИ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА
СКЛАДНИХ ВИРОБІВ**

Монографія

Харків

2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«Харківський політехнічний інститут»

Я. М. Гаращенко

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ АДИТИВНОГО
ВИРОБНИЦТВА СКЛАДНИХ ВИРОБІВ

Монографія

Харків
НТУ «ХПІ»
2023

УДК 621.7

Г20

Рецензенти:

Ф. В. Новіков, д-р техн. наук, проф., Харківський національний
економічний університет ім. С. Кузнеця;

О. А. Пермяков, д-р техн. наук, проф., Національний технічний
університет «Харківський політехнічний інститут»

*Публікується за рішенням вченої ради НТУ «ХПІ»,
протокол № 3 від 31.03.2023 р.*

У монографії викладено сучасні уявлення щодо планування та виконання задач технологічної підготовки процесів пошарової побудови для обладнання адитивного виробництва. Розглянуто питання визначення складності 3D-моделей виробів, вибору адитивного методу. Виконано оцінку ефективності процесів пошарової побудови на прикладі складних виробів для задач структурної декомпозиції виробу, його орієнтації та розташування в робочому просторі адитивної установки з подальшим адаптивним пошаровим розсіченням.

Для студентів, аспірантів, фахівців у галузі адитивного виробництва.

Гаращенко Я. М.

Г20 Удосконалення технологічної підготовки адитивного виробництва складних виробів: монографія / Я. М. Гаращенко. – Харків: НТУ «ХПІ», 2023. – 388 с.

The monograph presents modern ideas on planning and executing tasks related to the technological preparation of layered building processes for additive manufacturing equipment. It addresses issues such as determining the complexity of 3D models of products and choosing the appropriate additive method. Additionally, the effectiveness of layered building processes is evaluated on the example of complex products, with a focus on their structural decomposition, orientation, and placement within the additive machine workspace, followed by adaptive slicing.

This monograph is aimed at students, PhD candidates, and specialists in the field of additive manufacturing.

Іл. 143. Табл. 63. Бібліогр. 316 найм.

УДК 621.7

© Я. М. Гаращенко, 2023

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9	
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН І ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА.....		11
1.1. Аналіз сучасних тенденцій в області адитивних технологій.....	11	
1.2 Методи адитивних технологій	19	
1.3 Технологічність конструкції виробів з позицій необхідності і достатності використання адитивних технологій.....	22	
1.4 Особливості математичного опису поверхонь виробів	24	
1.4.1 STL-формат	25	
1.4.2 VRML-формат.....	26	
1.4.3 AMF-формат.....	27	
1.5 Шляхи підвищення ефективності технологічної підготовки.....	27	
1.5.1 Проблематика методів пошарової побудови.	28	
1.5.2 Задачі технологічної підготовки.	31	
1.5.3 Раціональна орієнтація виробу в робочій області побудови	34	
1.5.4 Створення підтримуючих конструкцій при пошаровій побудові	36	
1.5.5 Стратегія розсічення (нарізки) 3D-моделі виробу	37	
1.5.6 Стратегія формоутворення шару	38	
1.5.7 Перспективні напрямки підвищення ефективності технологічної підготовки.	39	
1.6. Вибір напрямків досліджень	41	
РОЗДІЛ 2 ЗАГАЛЬНІ УМОВИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	42	
2.1 Методологія досліджень в системі технологічної підготовки матеріалізації складних виробів адитивними методами	42	
2.2 Загальні умови досліджень.....	46	

2.3 Застосуване обладнання та матеріали	48
2.3.1 3D-принтер Ultimaker 3 Extended.	48
2.3.2 Система селективного лазерного спікання.	50
2.3.3 Система сканування на базі оптико-цифрової установки Imetric Iscan	52
2.3.4 Матеріали для матеріалізації виробів.....	57
2.4 Слюсарна обробка виробів після матеріалізації (постпроцес)	58
2.5 Верифікація тріангуляційних 3D моделей.....	58
2.6 Методика визначення якості тріангуляційної 3D-моделі виробу	60
2.7 Система комп'ютерного аналізу, верифікації та трансформацій тріангуляційних 3D-моделей виробів	66
2.8 Статистична обробка експериментальних даних	67

РОЗДІЛ 3 ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

ТЕХНОЛОГІЧНОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ВИРОБІВ ОДЕРЖУВАНИХ З ВИКОРИСТАННЯМ АДИТИВНИХ МЕТОДІВ 68

3.1 Особливості оцінки технологічності конструкції виробів одержуваних адитивними методами	68
3.2 Показники складності конструкції виробу	73
3.3 Оцінка геометричної складності промислових виробів на основі аналізу їх тріангуляційних 3D-моделей.....	74
3.3.1 Дослідження залежності кількості граней 3D-моделі від допустимої похибки тріангуляції.....	75
3.3.2 Дослідження залежності кількості граней 3D-моделі від максимально допустимого розміру ребра	86
3.3.3 Дослідження залежності кількості граней 3D-моделі від допустимого двогранного кута між суміжними гранями.....	95
3.4 Визначення показників складності промислових виробів	102
3.5 Показник технологічності щодо ефективності оборотної структурної декомпозиції виробу.....	108
3.6 Основні показники технологічності конструкції виробу	112

Висновки за розділом	116
----------------------------	-----

РОЗДІЛ 4 МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ КОМПЛЕКСНОЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА 118

4.1 Проблема реалізації комплексної технологічної підготовки стосовно до адитивного виробництва	118
4.2 Методологічні основи комплексного вирішення задач технологічної підготовки.....	122
4.2.1 Загальні відомості про елементну базу	122
4.2.2 Обґрунтування необхідності розробки комп'ютерної системи технологічної підготовки	123
4.2.3 Автоматизація розробки АМ-процесів	124
4.3 Алгоритмічне забезпечення комплексної технологічної підготовки	127
4.3.1 Вибір алгоритмічної бази	128
4.3.2 Метод Монте-Карло	129
4.3.3 Генетичний алгоритм	129
4.3.4 Математичний опис рішення оптимізаційної задачі з використанням генетичного алгоритму	134
4.3.5 Рекомендовані параметри генетичного алгоритму.....	136
4.4 Попередні етапи технологічної підготовки	137
4.5 Структурна оборотна декомпозиція та дослідження її впливу на ефективність розміщення 3D-моделей виробів в робочому просторі установки.....	137
4.5.1 Дослідження впливу числа частин виробу на використовуваний питомий об'єм робочого простору при їх розміщенні	140
4.5.2 Аналіз просторового розподілу матеріалу виробів.....	145
4.5.3 Показники прогнозованої ефективності декомпозиції і розміщення виробів в робочому просторі установки	148

4.5.4 Результати дослідження можливостей оцінки прогнозованої ефективності декомпозиції виробу на основі аналізу воксельної моделі.....	150
4.6 Раціональна орієнтація виробу на основі статистичного аналізу вихідної тріангуляційної 3D моделі.....	150
4.7 Задача розміщення 3D-моделі виробу в робочому просторі	154
4.7.1 Класифікація методів рішення.....	154
4.7.2 Постановка задачі.....	158
4.7.3 Аналіз варіантів вирішення задачі розміщення 3D-моделей.....	159
4.7.4 Опис особливостей застосованого методу рішення	160
4.8 Розміщення групи 3D-моделей в робочому просторі при мультизавантажуванні адитивної установки.....	160
4.9 Адаптивне пошарове розсічення 3D-моделі виробу.....	164
Висновки за розділом.....	173

РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ МАТЕРІАЛІЗАЦІЇ СКЛАДНИХ ВИРОБІВ АДИТИВНИМИ МЕТОДАМИ 175

5.1 Структура та основні елементи системи технологічної підготовки	176
5.2. Відповідність структури розробленої системи вимогам щодо ефективної реалізації технологічної підготовки.....	181
5.3 Перехід від тріангуляційної 3D-моделі виробу до бази даних, що використовується в системі технологічної підготовки	188
5.4 Перехід від тріангуляційної до пошарової моделі виробу	189
5.4.1 Стратегія пошарового розсічення.....	189
5.4.2 Аналіз контурів перетинів	192
5.4.3 Пошарова візуалізація.....	196
5.5 Перехід від тріангуляційної до воксельної 3D-моделі	197
5.6 Статистичний аналіз воксельної 3D-моделі виробу	199
5.7 Статистичний аналіз варіантів орієнтації виробу	200

5.8 Статистичний аналіз пошарової 3D-моделі.....	208
5.8.1 Оцінка відхилень від правильної форми, що виникають при пошаровій побудові.....	209
5.8.2 Оцінка фрактальної розмірності контурів пошарової побудови	214
5.9 Візуальний і статистичний аналіз тріангуляційної 3D-моделі виробу	230
5.10 Розміщення 3D-моделей в робочому просторі.....	238
5.10.1 Ручний режим	241
5.10.2 Метод Монте-Карло	243
5.10.3 Генетичний алгоритм	248
5.10.4 Процедура підвищення ефективності використання робочого простору	263
Висновки за розділом.....	266

РОЗДІЛ 6 ТЕХНОЛОГІЧНА ПІДГОТОВКА АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА СКЛАДНИХ ВИРОБІВ 271

6.1 Корекція кроку при пошаровій побудови зі змінною товщиною.....	271
6.2 Визначення раціональної орієнтації виробів у робочому просторі адитивної установки.....	279
6.2.1 Промислові вироби з простою геометрією поверхонь	282
6.2.2 Промислові вироби зі складною геометрією поверхонь	289
6.3 Комплексна технологічна підготовка адитивного виготовлення групи виробів	294
6.3.1 Моделі промислових виробів для адитивного виробництва	294
6.3.2 Структурна оборотна декомпозиція виробів	296
6.3.3 Визначення орієнтації виробів	297
6.3.4 Аналіз розподілу матеріалу 3D-моделей виробів	307
6.3.5 Раціональне розміщення композиції моделей у робочому просторі установки.....	309

6.3.6 Розміщення композиції 3D-моделей виробів після їх декомпозиції у робочому просторі установки.....	313
6.4 Адаптивне пошарове розсічення 3D-моделі виробу стосовно FDM-методу (3D-принтерів)	328
6.4.1 Дослідження впливу параметрів адаптивного розсічення на кількість шарів побудови	329
6.4.2 Аналіз ефективності адаптивного розсічення 3D-моделей.....	331
6.4.3 Статистичний пошаровий аналіз величин відхилень від правильної форми поверхні	332
6.5 Практична реалізація результатів дослідження	337
Висновки за розділом.....	340
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	343
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	347
ДОДАТОК. ОСНОВНІ ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ В ОБЛАСТІ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ	381

ВСТУП

Сучасне машинобудування характеризується високими вимогами до технічного рівня та якості виробів, а також необхідністю забезпечення гнучкості ресурсозберігаючого виробництва. У останні десятиліття адитивні технології прискорено розвиваються в технічно розвинених країнах. Ці технології дозволяють створювати промислові вироби з використанням методів пошарової побудови на базі комп'ютерних 3D-моделей без застосування спеціального технологічного обладнання.

Основною перевагою адитивних технологій є істотне скорочення часу повного циклу виготовлення виробів (залежно від ступеня їх складності, правильності вибору методу матеріалізації та ефективності виконання технологічної підготовки) до 2-10 разів.

Собівартість виготовлення промислових виробів з використанням адитивних технологій є значною. Ефективність використання адитивних технологій безпосередньо залежить від обґрунтованого вибору методу пошарової побудови виробів на основі аналізу їх вихідної 3D-моделі та прийняття раціональних технологічних рішень на етапі підготовки до матеріалізації.

В останнє десятиліття, при вивченні процесів формоутворення адитивними методами пошарової побудови, спостерігається тенденція зростання важливості технологічної підготовки, особливо при виготовленні складних виробів. Така необхідність диктується підвищенням рівня технічних можливостей обладнання адитивного виробництва. Передумовою для удосконалення технологічної підготовки є розвиток методів аналізу даних, апаратних можливостей комп'ютерної техніки та об'єктно-орієнтованих мов програмування. Однак, комплексної системи технологічної підготовки виробництва складних виробів адитивними методами з інструментами статистичного аналізу геометричних характеристик елементів 3D-моделі виробу, технічних і технологічних показників пошарової побудови в Україні та за кордоном не існує. Це пов'язано з відсутністю науково-обґрунтованих

критеріїв оцінки ефективності виконання задач технологічної підготовки адитивних методів. Розробка такої системи дозволить істотно скоротити обсяг експериментальних досліджень при визначенні раціональних умов реалізації потенційно високих можливостей існуючого обладнання.

Виконання наукових досліджень здійснювалось за планами науково-дослідних робіт кафедри «Інтегровані технології машинобудування» ім. М.Ф. Семка Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» згідно держбюджетних тем: "Дослідження прискореного виготовлення складнопрофільних виробів оборонного призначення на базі адитивних технологій і фінішної алмазно-абразивної обробки" (ДР №0120U001008) і "Удосконалення процесів адитивних технологій прискореного виготовлення складнопрофільних виробів на базі лазерної стереолітографії і фінішної вібраційно-абразивної обробки" (ДР №0122U001435).

Метою досліджень є створення основ і системи технологічної підготовки матеріалізації складних виробів на базі об'єктно-орієнтованої методології статистичного аналізу геометричних даних вихідних 3D-моделей та параметрів пошарової побудови для підвищення ефективності адитивних методів.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН І ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА

У цьому розділі описані напрямки вдосконалення ефективності технологічної підготовки процесів формоутворення виробів з використанням адитивних методів. Виконано аналіз конструкційних (геометричних) вимог до виробів, які виготовляються за допомогою адитивних технологій. Розглянуто особливості форматів опису поверхонь виробів, що застосовуються в адитивному виробництві. Виявлено шляхи підвищення ефективності технологічної підготовки, з урахуванням особливостей використання адитивних технологій.

1.1. Аналіз сучасних тенденцій в області адитивних технологій

Адитивне виробництво (адитивні методи та технології) - термін досить широкий, що об'єднує багато традиційних технологій. У стандарті ISO/ASTM 52900:2015 [1] дано визначення даного терміну. *Адитивне виробництво* - процес з'єднання матеріалу для виготовлення деталей за даними, що одержані з 3D моделі, зазвичай шар за шаром, на відміну від (субтрактивного) виробництва з відніманням матеріалу (механічної обробки) і традиційного формоутворюючого виробництва (лиття, штампування і т. д.). В оригіналі, "*Additive manufacturing (AM) - process of joining materials to make parts from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing and formative manufacturing methodologies. Note 1 to entry: Historical terms: additive fabrication, additive processes, additive techniques, additive layer manufacturing, layer manufacturing, solid freeform fabrication and freeform fabrication*".

ASTM стандарти приймають два основні терміни - *Additive Fabrication* (AF) та *Additive Manufacturing* (AM), а також їх синоніми: *additive processes* (адитивні процеси), *additive techniques* (адитивна техніка), *additive layer manufacturing* (пошарове адитивне виробництво), *layer manufacturing* (пошарове виготовлення) і *freeform fabrication* (виготовлення вільних форм). Ці терміни

можуть бути узагальнено та коректно переведені як «адитивні технології» або «адитивне виробництво». Термін "*Rapid Prototyping*" (швидке прототипування) не відповідає сучасним можливостям адитивних технологій і рекомендується вилучити з обігу.

В роботах [2, 3] представлений комплексний аналіз міжнародних стандартів, що стосуються адитивних технологій. У наукових колах загальноприйнятою назвою цих технологій є термін "*адитивне виробництво*", але в розмовній мові нерідко вживається термін "*3D-друк*" (*3D-printing*), який був започаткований студентами Массачусетського технологічного інституту у 1995 році [4, 5].

Протягом останніх трьох десятиліть, адитивні технології вважаються новими, але їх історія налічує понад 150 років, якщо розглядати такі області, як картографія та фотоскульптура. У 1860 році французький скульптор Ф. Віллем вперше отримав фотоскульптуру, використовуючи спеціально обладнану круглу кімнату, де людину, чию скульптуру належало зробити, фотографували за допомогою 24 камер, що рівномірно розподілені по стінах кімнати. Таким чином, скульптор отримав вичерпну інформацію про модель з усіх боків та міг відтворити її у матеріалі. У XIX столітті застосовували пошаровий метод для виготовлення прес-форм для друку рельєфних топографічних карт за даними топографічних ліній [5, 6].

Початок сучасних адитивних технологій можна відслідкувати до стереолітографії, яку розробив Отто Джон Мюнц у 1951 році [5]. Хоча загальноприйнято, що термін "адитивні технології" (раніше відомий як "*Rapid Prototyping*") з'явився в 1986 році, коли компанія 3D Systems створила першу установку лазерної стереолітографії, що використовувалася в оборонній промисловості. Однак, перші установки мали свої недоліки, такі як висока вартість та обмежений вибір матеріалів для створення моделей [7, 8].

У 1985 році була розроблена технологія ламінування LOM (*Laminated Object Manufacturing*), а в наступному році - технологія пошарового наплавлення FDM (*Fused Deposition Modeling*). В 1990-х роках адитивні

технології продовжували розвиватись, що дозволило виготовляти вироби з металів [7].

Початок інтенсивного розвитку адитивних технологій пов'язаний з розвитком комп'ютерних технологій проектування (CAD), інженерних розрахунків (CAE) та технологічної підготовки виробництва (CAM). Сьогодні адитивні технології застосовуються майже в усіх галузях виробництва. У машинобудуванні адитивні технології очікуються пріоритетними навіть найближчим часом [8].

Використання адитивних технологій дозволяє значно зменшити витрати матеріалу при виготовленні виробів. Наприклад, за оцінками European Aeronautic Defense and Space Company (Брістоль, Великобританія) та EOS Innovation Center (Уорвік, Великобританія), створення шарнірного куточка гондоли для літака з використанням адитивних технологій дозволяє економити до 75% матеріалу. Крім того, значною перевагою є можливість передачі 3D моделі виробу за допомогою комп'ютерної мережі та створення виробу в необхідному місці та часі [5].

Адитивні технології мають унікальні можливості для створення виробів, які мають геометричну складність, складну структуру матеріалів, ієрархічну складність та функціональну складність [9]. Зокрема, ці технології дозволяють створювати вироби з поверхнями складної форми та криволінійними контурами, а також з різноманітними розмірами, що відповідають потребам індивідуальних споживачів. Крім того, адитивні технології можуть використовувати композиції матеріалів з точковим або пошаровим розподілом, створювати вироби з ієрархічними багатовимірними структурами, а також безпосередньо виготовляти функціональні кінематичні пристрої.

Ринок адитивних технологій (AM) перевершує інші галузі виробництва за динамікою розвитку. Його річне зростання оцінюється в середньому на рівні 27%, і до 2030 року очікується досягнення більш ніж 50 млрд. доларів США, що є значним зростанням порівняно з 9,3 млрд. доларів США в 2018 році. У деяких випадках витрати на AM можуть складати до 10% від загальних витрат

на виробництво товару. Проте, пошук нових областей застосування АМ є головним напрямком розвитку цієї галузі [10].

За даними компанії Wohlers Associates Inc. [10, 11], у 2014 році найбільшу частку на ринку адитивних технологій складає швидке прототипування - 35%, за ним слідує інструментальне виробництво - 25%. Решта розділяється між дослідженнями та освітою. За цими даними, 54% обсягу ринку становить продукція технологій, 26% - виробництво обладнання та 19% - виробництво вихідних матеріалів.

На рис. 1.1 представлено розподіл відносного застосування адитивних технологій за галузями економіки [11].

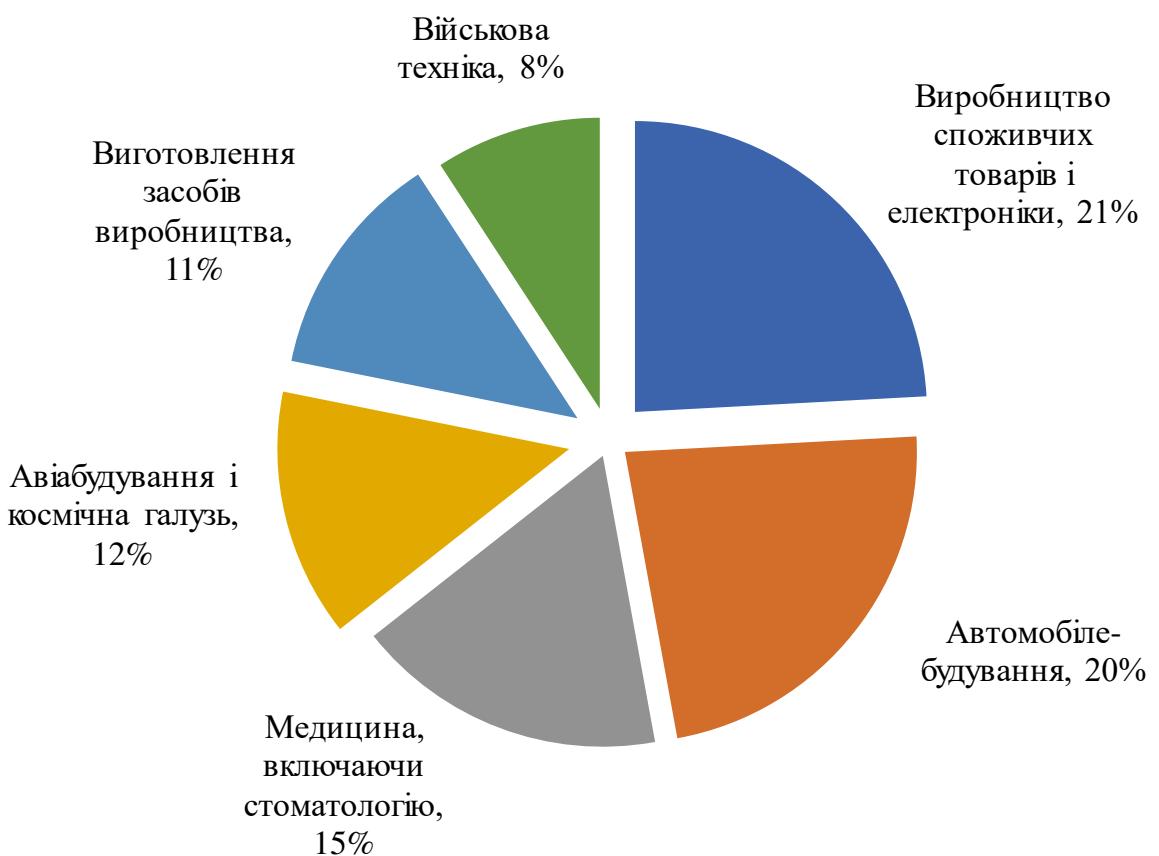


Рисунок 1.1 – Розподіл за галузями економіки застосування адитивних технологій

Згідно з Wohlers Report [10], на 2014 рік у світі було встановлено майже 80 тисяч промислових АМ- установок, з яких 38,1% установок вартістю понад 5 тисяч доларів США працюють в США, 9,3% - в Японії, 9,2% - в Китаї і 8,7% - в Німеччині. Інші країни світу значно відстають від цих лідерів. Дані щодо

зростання річних об'ємів продажу АМ-установок по металу за останні роки наведені на рис. 1.2.

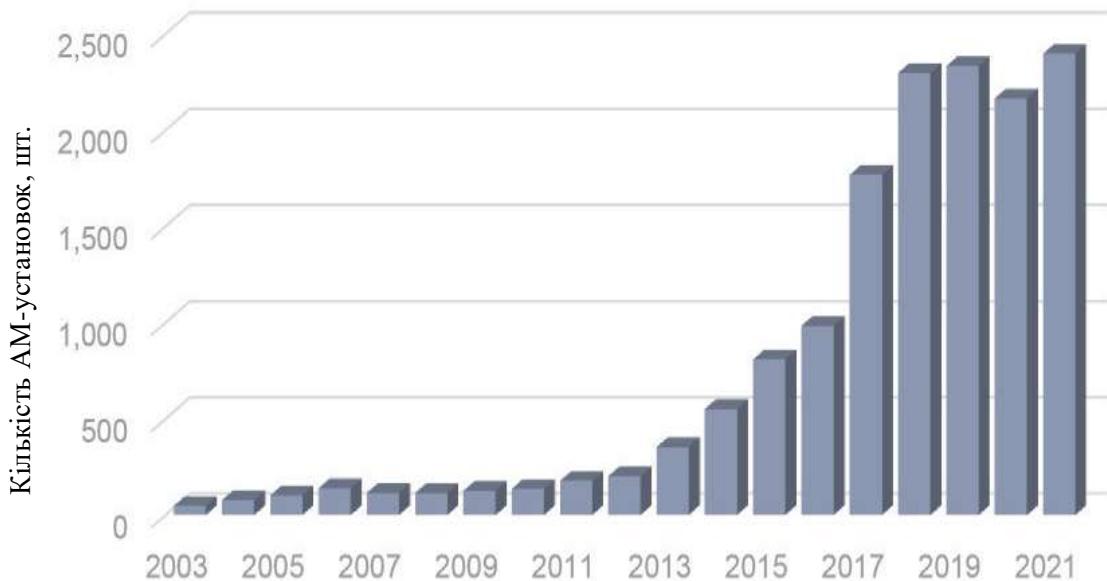


Рисунок 1.2 – Обсяги продажів АМ- установок по металу за 2003-2021 рр.

У 2014 році, більшість продажів АМ- установок, а саме 91,6%, припадає на настільні 3D-принтери, а решта 8,4% - на промислові установки адитивного виробництва, що принесли 86,6% від загального обсягу прибутку (1,12 млрд. доларів США). Найбільший ріст відбувається в сегменті доступних офісних 3D-принтерів, що спрямовані на виготовлення прототипів [5]. Наприклад, за даними SmarTech Analysis, в 2020 році глобальний ринок настільних адитивних машин становив близько 1,5 мільярда доларів США. Очікується, що до 2025 року цей ринок зросте до 6,5 мільярда доларів США. Проте, варто зазначити, що ці прогнози можуть бути змінені залежно від різних факторів, таких як розвиток нових технологій, конкуренція на ринку та економічні зміни.

Метод FDM (*Fused Deposition Modeling*) очолює рейтинг адитивних технологій і налічує близько 300 виробників установок, хоча деякі з них продаються тільки в певних регіонах, тому загальна кількість виробників 3D-принтерів не може бути точно визначена. Однак основною перевагою FDM- установок є їх найбільший у порівнянні з іншими методами робочий простір пошарової побудови. Наприклад, німецька компанія BigRep випускає FDM-

принтер BigRep ONE, який коштує 36 тис. євро, має об'єм робочого простору більше 1 м³ та допуск на розміри виробу ≤ 0,1 мм [12].

Адитивні технології пережили свій найбільш інтенсивний розвиток у 2009 році, коли закінчився термін дії одного з перших патентів на метод FDM. Це призвело до значного зниження вартості FDM- установок та їх значного вдосконалення виробниками протягом останнього десятиліття.

В Європі налічується шістнадцять компаній, які займаються виробництвом та продажем висококласних установок вартістю від 200 тисяч до 2 млн доларів США, сім компаній знаходяться в Китаї, п'ять - в США та дві - в Японії. Серед провідних виробників можна відзначити американські компанії 3D Systems, DTM, Helisys, Makerbot, Solidscape, Stratasys, Z Corporation і ExOne, англійську Bits from Bytes, ізраїльські Objet та Solido, італійську DWS, китайську Beijing Yinhua, шведську Arcam, а також німецькі EOS, Envisiontec і Voxeljet [10, 13].

За кількістю наукових публікацій було визначено наукову активність в галузі адитивних технологій. За даними Google Scholar, лідерами в цій галузі є Китай, Південна Корея, США та Японія, при тому, що ці країни зареєстрували 90% патентів в цій галузі [5]. Україна ж має дуже малу частку менше 0,01% від загальної кількості.

Дослідження в області адитивних технологій є дуже актуальними, що підтверджує аналіз світових періодичних видань. На сьогоднішній день, найбільш поширеними та відомими журналами, які публікують статті на цю тему та мають найбільшу кількість посилань, є такі: CIRP Annals - Manufacturing Technology, Computer Aided Design, Computers in Industry, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, International Journal of Production Research, International Journal of Machine tools and Manufacture, Journal of the European Ceramic Society, Journal of Materials Processing Technology, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Materials and Design, Precision Engineering, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Rapid Prototyping Journal,

Robotics and Computer Integrated Manufacturing, а також Tsinghua Science and Technology.

Аналізуючи дані з Google Scholar, було виявлено, що публікації на тему "additive manufacturing" є предметом зростаючого інтересу, який ілюструється на графіку на рис. 1.3.

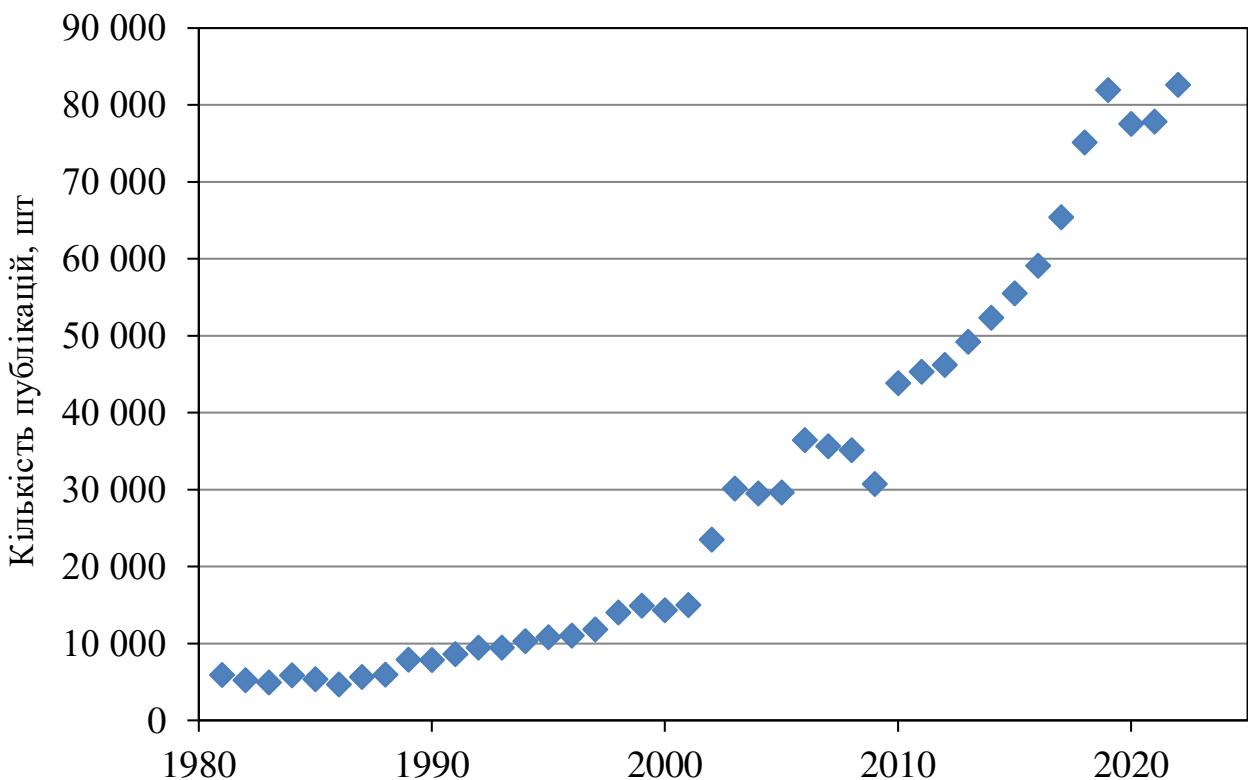


Рисунок 1.3 – Кількість публікацій (включаючи патенти) за роками

Загалом можна виділити кілька ключових тенденцій у публікаціях з адитивного виробництва (технологій і методів) на основі даних з Google Scholar:

- зростання кількості публікацій майже у 10 разів порівняно з 2000 роком;
- зростання різноманітності досліджень (перші роки дослідження були переважно зосереджені на розробці нових методів і матеріалів для адитивного виробництва, протягом останніх кількох років фокус дослідження розширився, включаючи такі теми, як біомедична друкована електроніка, біологічні матеріали, технології "розумної" виробничої лінії та багато іншого);
- зростання зацікавленості промисловості (індустрія стає все більше

зацікавленою в адитивному виробництві, це відображається в зростанні кількості публікацій в промислових журналах та наукових роботах від авторів з промислових компаній);

- зростання співпраці між науковими групами та компаніями (зростання зацікавленості в адитивному виробництві призвело до збільшення кількості співпраці між науковими групами та компаніями).

Основні тенденції розвитку адитивних технологій на основі даних з Google Scholar можуть бути узагальнені наступним чином:

- поліпшення якості та точності виготовлення деталей (досягається за допомогою розробки нових матеріалів, удосконалення процесів пошарової побудови, підвищення ефективності моніторингу та зменшення відхилень вимірювань);

- розширення асортименту виготовлюваних виробів (адитивні технології стають все більш універсальними та можуть виготовляти від невеликих деталей до складних виробів, включаючи елементи, що містять механічні та електронні компоненти);

-зниження вартості виробництва (шляхом оптимізації процесів пошарової побудови, пошуку дешевих матеріалів, збільшенням продуктивності та автоматизації процесів виготовлення);

- розвиток гіbridних методів виробництва (гіbridні методи поєднують адитивні з традиційними методами виробництва, такими як фрезерування або гаряча ковка, це дозволяє одержувати вироби з кращими характеристиками, недосяжними адитивним методам);

- застосування адитивних технологій у різних галузях (не тільки у виробничих галузях, але й у медицині, авіації, архітектурі, харчовій промисловості та інших сферах);

- поліпшення екологічної стійкості (шляхом зменшення витрат ресурсів та енергії в процесах виробництва, використання екологічно чистих матеріалів, скорочення кількості відходів та використання їх вторинного застосування).

Аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку адитивних технологій

пошарового вирошування виробів підтверджує актуальність та перспективність подальших досліджень в цій області. Для успішного проведення наукових досліджень необхідно вивчити відомі методи адитивного виготовлення шляхом пошарової побудови та розглянути можливі шляхи їх оптимізації для досягнення максимальної ефективності.

1.2 Методи адитивних технологій

На даний момент існує значна кількість адитивних технологій, що успішно використовують принцип пошарової побудови виробів. У ряді наукових досліджень [1, 6, 7, 15-19] були запропоновані та описані класифікації адитивних технологій, що дозволяють обґрунтовано обрати адитивний метод виготовлення відповідно до потреб і вимог заданого виробу.

В роботах [6, 16, 20] наведено опис адитивних методів макрорівня. Ці методи позначаються абревіатурами, складеними з початкових букв англійських слів їхніх назв [6, 7, 21-35], зокрема:

- 2PP (Two-photon Polymerization) - двухфотонна полімеризація для біологічного виробництва [36];
- 3DGP (3D Gel-printing) - 3D друк гелем [37];
- 3DW (Three Dimensional Welding) - тривимірне зварювання (наплавлення);
- AFSD (Additive Friction Stir Deposition) - адитивне фрикційне перемішування з осадженням матеріалу [33];
- AJ (Aerosol Jetting) - аерозольно струменеве нанесення матеріалу [38];
- BAAM (Big Area Additive Manufacturing) – великомасштабне (на великій площі) адитивне виробництво [39];
- BJ3DP (Binder Jet Three Dimensional Printing) – тривимірний друк струминного пошарового склеювання [40];
- BPM (Ballistic Particle Manufacturing) - виготовлення з використанням балістики частинок;
- CLAD (Construction Laser Additive Direct) - пряма лазерна адитивна

побудова;

- CLF (Ceramic Laser Fusion) – лазерне сплавлення кераміки [41];
- CSAM (Cold Spray Additive Manufacturing) – адитивне виробництво холодним розпиленням [42];
- CLIP (Continuous Liquid Interface Production) – виробництво з безперервної подачі рідини [43];
- DLP (Digital Light Processing) – цифрова обробка світлом [44];
- DMD (Direct Metal Deposition) - пряме нанесення металу (з 2000 р.);
- DMLS (Direct Metal Laser Sintering) - пряме лазерне спікання металу;
- FDM (Fused Deposition Modeling) - моделювання пошаровим наплавленням (з 1991 р.) [45];
- FFF (Fused Filament Fabrication) - спосіб наплавлення ниток;
- FPM (Fused Pellet Modeling) – моделювання плавленими гранулами [46];
- GPD (Gas Phase Deposition) - осадження з газової фази;
- EBAM (Electron Beam Additive Manufacturing (wire fed)) – електронно-променеве адитивне виробництво [47];
- EBDM (Electron Beam Direct Manufacturing) - пряме електронно-променеве виготовлення;
- EBM (Electron Beam Melting) - електронно-променеве оплавлення [48];
- ECAM (Electrochemical additive manufacturing) – електрохімічне адитивне виробництво [49];
- HIS (Holographic Interference Solidification) - затвердіння голограмічною інтерференцією;
- HSS (High Speed Sintering) – високошвидкісне спікання [50]
- IJP (Ink Jet Printing) – струменевий друк [51];
- Ink-Jet (Binder Jetting) - пошарове склеювання композитного порошку сполучних речовин (з 1989 р.);
- LENS (Laser Engineering Net Shaping) - лазерне наплавлення (з 1998 р.) [52];
- LMHAM (Localized Microwave Heating Based AM) - локалізований

міковолновий нагрів [53];

- LOM (Laminated Object Manufacturing) - виготовлення об'єктів ламінуванням (з 1991 р.);
- MAPS (Microheater Array Powder Sintering) – спікання порошку множиною мікронагрівачів [54];
- MDDM (Micro Droplet Deposition Manufacturing) – виробництво осадженням мікро капель [55];
- MJF (Multi-Jet Fusion) – багатоструменеве сплавлення [56]
- MJM (Multi Jet Modeling) - багатоструменеве затвердіння;
- MJS (Multiphase Jet Solidification) - затвердіння багатофазним струменем;
- PAD (Plasma Arc Additive Manufacturing) – адитивне виробництво плазмовою дугою [57];
- PJ (Photopolymer Jetting) – виготовлення фотополімерним струменем;
- PME (Powder Melt Extrusion) - екструзія розплавленого порошку [58]
- RFP (Rapid Freeze Prototyping) - швидке прототипування заморожуванням [59]
- RMPD (Rapid Micro Product Development) - швидке одержання міковиробів;
- SGC (Solid Ground Curing) - багатоетапний процес з використанням ультрафіолетового лазера і фрезерної обробки кожного шару;
- SHS (Selective Heat Sintering) - селективне теплове спікання [60];
- SL / SLA (Stereo Litographics Apparatus) – стереолітографія (з 1987 р.) [29, 44];
- SLS (Selective Laser Sintering) - селективне лазерне спікання (з 1992 р.) [61];
- SLM (Selective Laser Melting) - селективне лазерне розплавлення (з 1999 р.) [62];
- SPLS (Solid Phase Laser Sintering) - твердофазне лазерне спікання;
- T3DP (Thermoplastic 3D printing) – 3D друк термопластиками [63];

- TDP (Three Dimensional Printing) – 3D друк (з 1999 р.);
- WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) – адитивне виробництво проволоки [64].

У роботі [65] здійснено детальний огляд матеріалів, які використовуються у адитивному виробництві. У свою чергу, робота [66] присвячена огляду обладнання, яке застосовується для отримання металевих виробів адитивними методами. Розподіл популярності АМ-методів для одержання виробів з металевих порошків представлено на рис. 1.4.

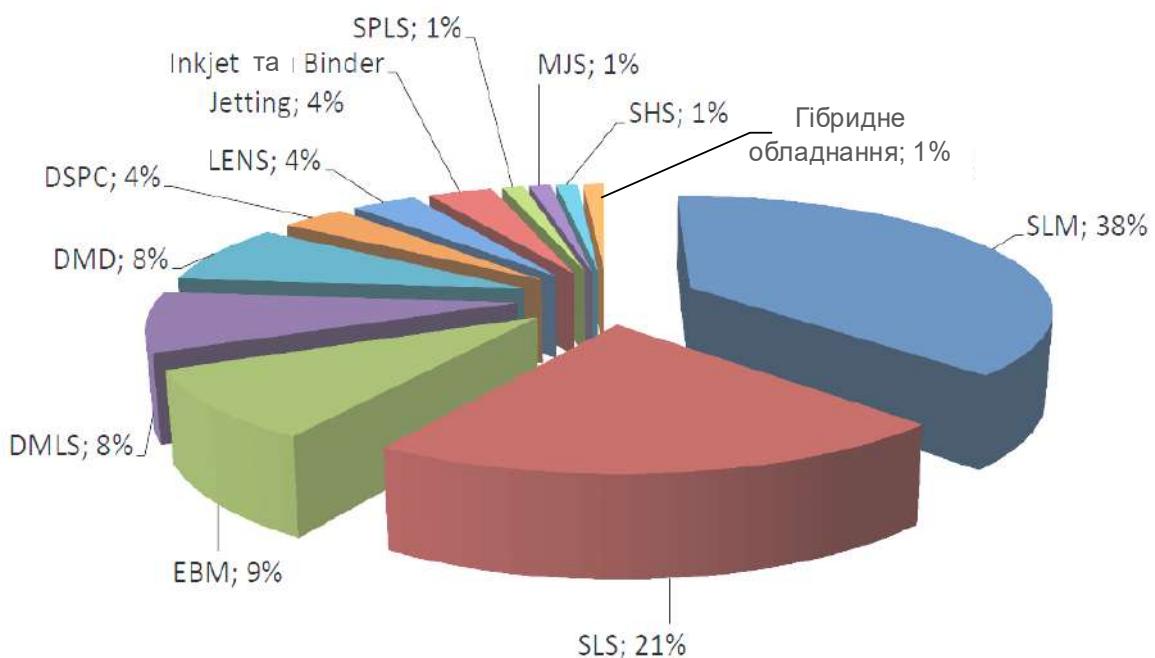


Рисунок 1.4 – Розподіл адитивних методів виготовлення металевих виробів [67]

Серед адитивних методів виготовлення промислових виробів з металевих порошків найбільш популярними є SLM і SLS (використовуються у переважній більшості), як показано на рис. 1.4.

1.3 Технологічність конструкції виробів з позиції необхідності і достатності використання адитивних технологій

Технологічність виробу означає сукупність властивостей конструкції, які визначають можливість її оптимізації щодо використання матеріальних, трудових та часових ресурсів на всіх етапах розробки, виробництва та експлуатації в конкретних організаційно-технологічних та виробничих умовах

[68, 69]. Це визначення показує, що показники технологічності залежать від умов виробництва.

Для забезпечення технологічності конструкції виробів необхідно провести відпрацювання їх конструкції на етапі конструкторської та технологічної підготовки виробництва, виконати кількісну оцінку технологічності конструкції та забезпечити технологічний контроль конструкторської документації [69].

Стосовно до адитивних технологій є характерна особливість у відпрацюванні конструкції виробу на технологічність. На відміну від субтрактивних методів виготовлення, технологічність конструкції, отриманої за допомогою адитивних методів, не залежить від типу виробу, його ступеня новизни, складності або об'єму випуску. При цьому складність виробу має значно менші обмеження порівняно зі субтрактивними методами.

Оцінка технологічності конструкції включає комплекс взаємопов'язаних заходів щодо зниження трудомісткості, матеріаломісткості, технологічної собівартості та енергоємності виробу [69]. Відповідно основними показниками при відпрацюванні конструкції на технологічність є: трудомісткість виготовлення, матеріаломісткість, технологічна собівартість та енергоємність [68, 70-72].

Кількісна оцінка технологічності проводиться за допомогою наступної системи показників [68]:

- базові (границні, нормативні) показники технологічності, необхідні для забезпечення;
- досягнуті показники технологічності, які визначаються на кожному етапі конструкторської та технологічної підготовки;
- показник рівня технологічності конструкції виробу.

Показники технологічності необхідно визначати з урахуванням складності виробів і способів виготовлення (необхідні умови розробки системи показників технологічності виробу одержаного з використанням адитивних методів). Тому є важливою розробка критеріїв оцінки складності виробу з

урахуванням особливостей пошарової побудови та полігонального представлення вихідної 3D-моделі (достатні умови). При цьому число показників повинно бути мінімальним, але достатнім для оцінки технологічності.

Оцінка технологічності конструкції стає дедалі важливішою при використанні адитивних технологій через зростання складності виробів. Ця оцінка впливає не лише на вибір методу виготовлення, але й на ефективність та доцільність його застосування. Традиційний підхід до відпрацювання конструкції не є задовільним для адитивних технологій, оскільки нормативна база в цьому напрямку відсутня. Хоча ідеологія виготовлення пошаровою побудовою є спільною, технологічні можливості різних методів суттєво відрізняються. Тому рівень технологічності розробленої конструкції може не задовольняти базові показники для деяких адитивних методів [73].

Інтенсивний розвиток адитивних технологій (Additive Manufacturing) і їх особливості по виготовленню виробів складної геометрії створює потребу в розробці науково обґрунтованої методології оцінки технологічності виробів для раціонального вибору стратегії виготовлення на основі геометричної інформації щодо виробу [74]. В рамках такої методології повинна створюватися база даних геометричних і технологічних обмежень АМ-методів [75]. Така база дозволить сформулювати єдині необхідні умови (визначити характерні показники конструкції виробів) для обґрунтованого використання адитивних технологій і достатні умови для використання конкретного АМ-методу виготовлення заданого виробу.

1.4 Особливості математичного опису поверхонь виробів

Адитивні технології використовують 3D-моделі як вихідну геометричну інформацію для виготовлення промислових виробів. В роботах [76, 77] представлено основні підходи до 3D-моделювання виробів, а також загальні вимоги, що пред'являються до таких моделей. Серед цих вимог - представництво, однозначність, унікальність, точність, коректність,

замкнутість, компактність та ефективність. Модель повинна точно описувати поверхні виробу і бути достатньо компактною, але при цьому забезпечувати високу ефективність обробки даних.

Для створення 3D-моделей, що використовуються в адитивному виробництві, і загалом у програмному забезпеченні технологічної підготовки процесів виготовлення виробів, існує кілька відомих форматів опису. До полігональних моделей належать такі формати, як 3MF, AMF, OBJ, PLY, SAT, STL, VRML та X3D [4, 78, 79]. Моделі з описом набору 2D перерізів представлені форматами CLI (Common Layer Interface), F&S, SLC (Stereolithography Contour), SSL, DCM (DICOM) та GCODE (KISSlicer). До воксельних моделей відносяться формати AMF, BINVOX, MIRA [80-83]. Також до переліку форматів файлів для передачі CAD-даних можна додати кілька загальноприйнятих: IGES (Initial Graphics Exchange Specification), HPGL (Hewlett-Packard Graphics Language), STEP (Shape Transfer Exchange Protocol), RPI (Rapid Prototyping Interface) та LEAF (Layer Exchange ASCII Format).

Для передачі CAD-даних в області адитивних технологій в основному використовують STL-формат, проте також поширений PLY-формат, який дозволяє вказати кольори для елементів полігональної моделі. Деякі системи АМ-установок підтримують VRML-формат. Новіші формати, такі як 3MF і AMF, розроблені для заміни STL і підтримуються в останніх версіях CAD-систем, таких як Solidworks, PowerShape та CimatronE.

1.4.1 STL-формат

STL є широко визнаним стандартним форматом в галузі адитивних технологій для передачі геометричних даних, особливо він популярний для опису поверхонь 3D-моделей. У цьому форматі поверхні моделей описуються координатами вершин плоских трикутних граней та векторів їх нормалей. Однак, недоліком STL-формату є неповноцінна передача геометричної інформації для обміну даними між різними CAD-системами.

Досвід використання адитивних технологій показує, що значна частина отриманих виробів використовується для візуалізації [11]. З розвитком

сучасних технологій з'явилася можливість створювати кольорові (неоднотонні) вироби. Однак, для економії матеріалу при використанні багатьох видів 3D-принтерів передбачено враховувати колір тільки для зовнішньої оболонки об'єкту без відображення внутрішніх об'ємів. Це призвело до проблеми вибору формату файлу, який повинен зберігати геометричну інформацію та дані про колір. Формат STL обмежений в можливості опису кольору для елементів моделі виробу. Деякі програми реалізують підтримку кольору шляхом додавання відповідної інформації в резервні розділи для кожної трикутної грані в STL-файлі.

Для зберігання інформації про колір у бінарному форматі STL-файлу, системи VisCAM і SolidView використовують два виділені резервні байти дляожної трикутної грані, які зберігають 15-бітне значення RGB кольору [84]. У свою чергу, система Materialise Magics використовує 80 байт, які призначені для приміток файла [84]. Для запису інформації про колір у заголовку використовується ключове слово "COLOR =" у бінарному вигляді, за яким слідує 4 байти (RGBA), що описують компоненти кольору - червоний, зелений, синій і прозорість в діапазоні 0÷255. При цьому інформація про колір застосовується до всієї 3D-моделі.

1.4.2 VRML-формат

VRML (Virtual Reality Modeling Language) - це мова моделювання віртуальної реальності, яка відповідно до стандартів ISO / IEC 14772-1:1997 і ISO / IEC 14772-2:2004, є сумісною з різними платформами побудови, і підтримує 3D формат зображення та різні мережеві можливості. Формат VRML-даних дозволяє описувати 3D-об'єкти або сценарії у об'єктно-орієнтованому стилі. Основними компонентами формату мови VRML є типи вузлів та канали зв'язку. Типи вузлів включають паралелепіпеди, циліндри, конуси і сфери, які можна комбінувати для створення складних тривимірних зображень [85].

1.4.3 AMF-формат

STL-формат був створений в 80-х роках минулого століття з появою технології стереолітографії (SLS) і залишається домінуючим форматом для використання на промислових АМ-установках [79, 84]. Однак, з розвитком адитивних технологій, виробництво однорідних форм з одним матеріалом перейшло до виробів зі складною геометрією з різними за кольором, хімічним складом і фізичними характеристиками матеріалів. У зв'язку з цим, STL-формат більше не задовольняє зростаючі потреби сучасних технологій.

Один з чинників, який призвів до появи нового стандарту файлу, полягає в постійному зростанні точності пошарової побудови. Існуючий рівень точності (до 0,001 мм) вимагає використання більшого числа трикутних граней для забезпечення плавного відображення криволінійних поверхонь 3D-моделі виробу. Це призводить до збільшення розмірів файлів у форматі STL.

У 2009 році був створений Комітет F42 в ASTM International - добровільній міжнародній організації, що займається розробкою стандартів в області адитивних технологій. Формат AMF був створений, щоб зменшити розрив між можливостями CAD-систем та сучасним рівнем адитивних технологій. У форматі AMF зібрана інформація щодо геометрії виробу, матеріалів АМ, кольору та внутрішньої структури [78].

AMF-формат базується на форматі XML, що дозволяє системам автоматизованого проектування описувати геометричну форму та склад 3D-об'єкта з урахуванням конкретних задач підготовки до пошарового виготовлення (матеріалізації) на певному обладнанні [78, 82]. Особливий інтерес становить вивчення особливостей форматів AMF та STL для опису геометричної інформації щодо 3D-моделі промислового виробу.

1.5 Шляхи підвищення ефективності технологічної підготовки

Явна перевага пошарової побудови полягає в тому, що геометрична складність виробу надає значно менший вплив на процес виготовлення і відповідно на технологічну підготовку, ніж у випадку традиційних

(субтрактивних) виробничих процесів. Більшість процесів адитивних технологій не вимагають безпосереднього втручання людини, крім виконання процесів постобробки поверхонь [86-90].

У результаті аналізу достатньої кількості публікацій визначено розподіл за напрямками досліджень адитивних методів пошарової побудови промислових виробів. Даний розподіл представлено на рис. 1.5.

Дослідження процесів формоутворення виробів методами адитивного виготовлення [7, 8] та інші підтверджують наявність великого потенціалу для підвищення продуктивності та ефективності цих процесів. Для досягнення цих цілей розглядаються різні перспективні шляхи, включаючи удосконалення конструкторської та технологічної підготовки [73, 91].

На рис. 1.6 зображена система проблем та напрямків досліджень, спрямованих на підвищення ефективності підготовки адитивного виробництва. Більшість ознак та їхні властивості запозичені з дослідження [92].

Удосконалення технологічної підготовки виготовлення складних виробів з використанням адитивних методів пов'язане з підвищеннем ефективності виконання оптимізаційних задач підготовки вихідної 3D-моделі виробу до АМ-процесів формоутворення [9, 75, 93-95].

1.5.1 Проблематика методів пошарової побудови.

Сучасні дослідження в області адитивних технологій сфокусовані на усуненні природніх недоліків принципу пошарової побудови, які включають низьку точність і продуктивність, вузький діапазон фізико-механічних і хімічних властивостей матеріалів, особливо в порівнянні з традиційними методами виготовлення. Пошарова побудова, як принципово інший метод виробництва, вимагає унікальних задач технологічної підготовки, що потребують специфічного рішення з використанням потенціалу сучасних інформаційно-комп'ютерних технологій [96]. На етапах конструкторської та технологічної підготовки, а також при розробці конструкції, аналіз технологічності і моделюванні виробів виникають нові проблеми, які особливо потребують більш ефективного вирішення для виробів зі складними

- використання адитивних методів;
- використовувані матеріали;
- вибір стратегії побудови, задачі технологічної підготовки;
- програми CAD-AM (RP);
- якість поверхні;
- зносостійкість та механічна міцність;
- розмірна точність;
- вибір методу (процесу побудови).

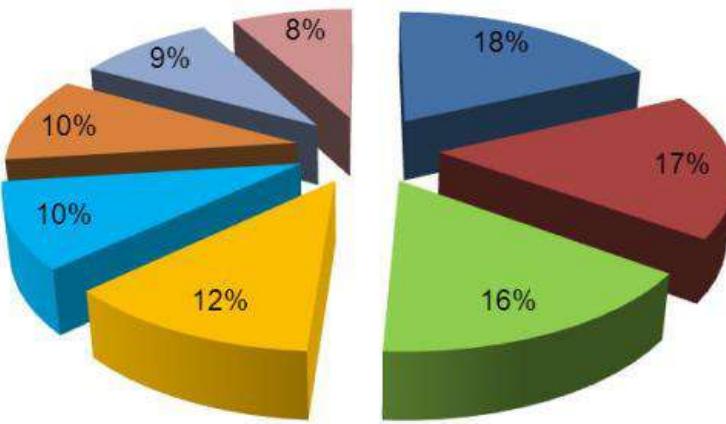


Рисунок 1.5 - Структура публікацій за напрямками досліджень



Рисунок 1.6 – Проблеми та наукові напрямки з ефективної підготовки АМ

геометричними поверхнями (складною конфігурацією) [97].

У процесі конструкторської підготовки виробу першочерговим завданням є створення CAD-моделі, яка може мати різні формати, такі як твердотільна, поверхнева або полігональна. На сьогоднішній день, проблема розробки правил (DFAM - design for additive manufacturing [9, 75, 93, 98-108]) все ще вирішується, з метою розробки оптимальної конструкції та створення 3D-моделі, яка містить необхідну інформацію, щоб забезпечити ефективну реалізацію технологічних можливостей методів адитивного виробництва з використанням пошарової побудови.

Напрямок досліджень, пов'язаний із розробкою правил DFAM та створенням 3D-моделей (у нових форматах файлів, див. розділ 1.4), охоплює широкий спектр проблем пошарової побудови та має важливе значення для вирішення задач технологічної підготовки АМ-виробництва [104, 107-109].

На етапі технологічної підготовки виробництва адитивних технологій першочерговою задачею є планування технологічного процесу пошарової побудови, що забезпечує його ефективність та точність формоутворення виробу. Зазвичай, програмне забезпечення, що постачається разом з АМ-установкою, виконує повний процес планування та виконання задач технологічної підготовки. Однак, більшість задач є загальними для всіх методів адитивних технологій, тому можуть бути розроблені ефективні алгоритми для їх виконання в інтегрованій системі технологічної підготовки [15, 91, 109]. Це дозволить скоротити час експлуатації установки на етапі підготовки 3D-моделі виробу до пошарової побудови. Даний напрямок досліджень відноситься до обчислювальних проблем, зокрема вибору методик, алгоритмів розрахунку та оптимізації.

Існують значні обмеження щодо використання АМ-матеріалів для пошарової побудови виробів. З метою розширення діапазону матеріалів та використання матеріалів з кращими характеристиками, проводиться безліч досліджень [110, 111]. Аналіз аспектів виробництва включає розробку нових способів реалізації, технологій та поліпшення властивостей матеріалів, що

належить до третьої групи проблем.

Четверта група проблем пов'язана з передачею даних від CAD-моделі до задач технологічної підготовки АМ-процесів пошарової побудови [78, 80]. У розд. 1.4 розглянуто формати файлів, які використовуються для передачі даних у адитивних технологіях. Наразі досліджуються питання передачі даних на всіх етапах життєвого циклу виробу. Проблеми, що пов'язані з визначенням режиму та вмісту переданих даних, відносяться до проблем передачі даних [109].

Контроль виробів зі складною геометрією зазвичай виконується з використанням установок для зворотного (реверсного) інжинірингу [112], які можуть працювати на основі контактних і безконтактних методів. Проте існують проблеми контролю через складну геометрію виробів [113]. На сьогоднішній день існує проблема розробки стандартів для визначення фізико-механічних властивостей виробів через складний склад матеріалів та значну анізотропію властивостей у результаті пошарової побудови виробів. Всі перераховані проблеми формують групу проблем контролю.

Ряд досліджень [114, 115] зосереджуються на проблемі вибору методу адитивного виготовлення, з урахуванням геометрії 3D-моделі, та конструктивних особливостей виробу.

Існує ще один напрямок досліджень щодо інтеграції процесів пошарової побудови і традиційних методів обробки (зі зняттям матеріалу) [116, 117]. Цей напрямок націлений на усунення недоліків пошарової побудови щодо точності виготовлення та шорсткості поверхонь виробів, але створює проблему реалізації такої інтеграції процесів.

1.5.2 Задачі технологічної підготовки.

Технологія отримання виробів [7] розробляється на основі аналізу вихідної тріангуляційної 3D-моделі. Основні завдання технологічної підготовки процесів АМ включають вибір методу виготовлення та матеріалу виробу, планування завантаження обладнання, оцінку конструкції на технологічність, стратегію виготовлення, структурну оборотну декомпозицію, раціональну орієнтацію виробу на робочій платформі, масштабування тріангуляційних

моделей (з урахуванням технологічної компенсації усадки матеріалу), створення структур підтримки (наприклад, для методів SLA і FDM), вибір стратегії розсічення (нарізки) 3D-моделі для створення набору перетинів, завдання параметрів формоутворення шарів та постобробки тощо. Схему виконання завдань технологічної підготовки процесів АМ представлено на рис. 1.7 [91, 109, 116, 117].

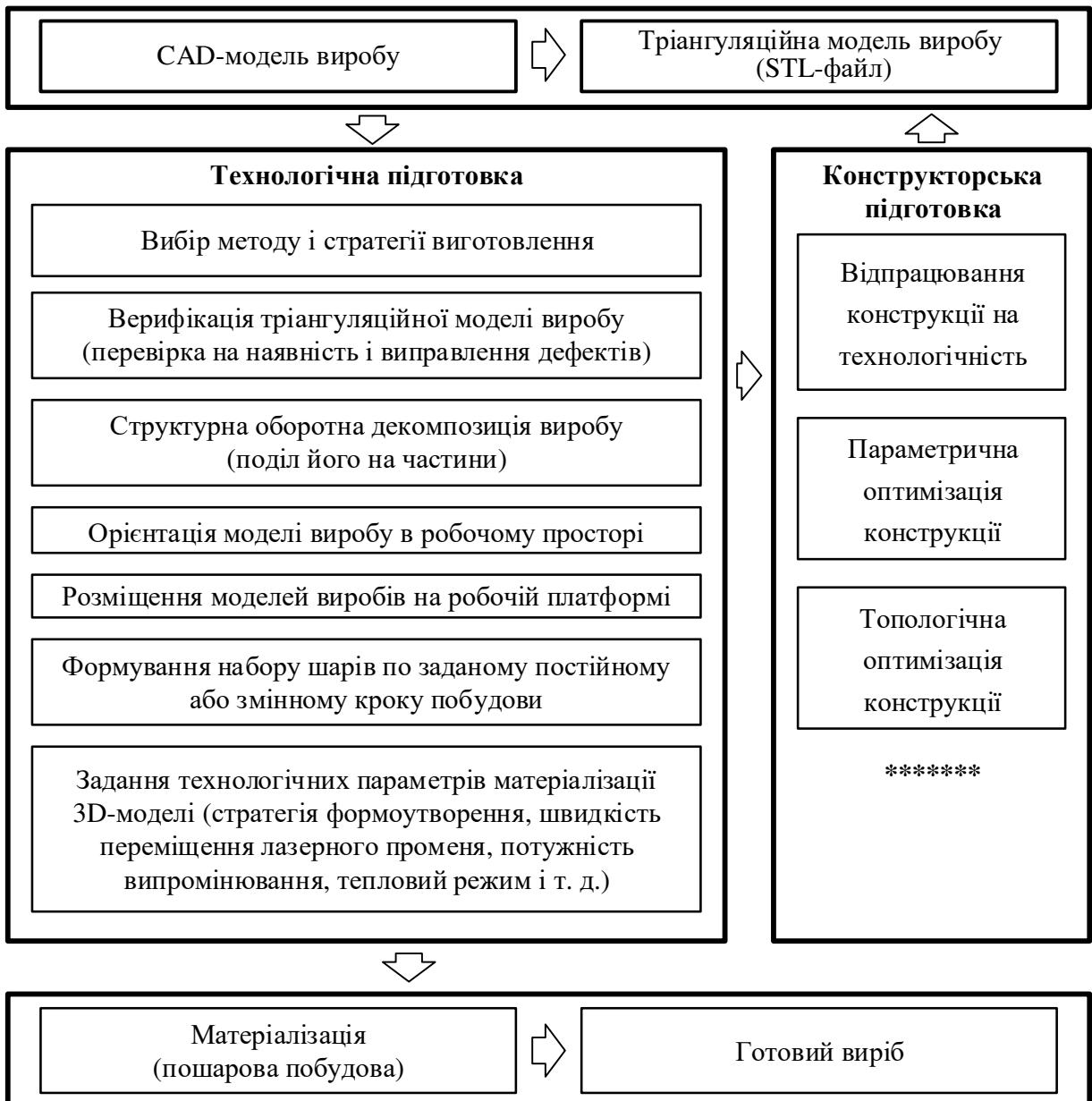


Рисунок 1.7 – Послідовність виконання задач технологічної підготовки до матеріалізації виробу адитивними методами

Загалом, задачі технологічної підготовки АМ-процесів є взаємопов'язаними і включають різні аспекти щодо процесів виготовлення та

властивостей виробів, що виникають від загальних обмежень [109]. Наприклад, визначення раціональної орієнтації, розміщення та створення структур підтримки є такими задачами. Через особливості деяких адитивних методів пошарової побудови деякі поверхні потребують підтримки при формоутворенні пошаровою побудовою. Конструкція структур підтримки суттєво визначається попередніми задачами, так як вони впливають на площину поверхонь виробу, що потребують підтримки, а також на об'єм таких структур. Орієнтація виробу у робочому просторі зазвичай вибирається за критерієм мінімальної площини «звисаючих» поверхонь, але також має великий вплив на фізико-механічні властивості виробу через його анізотропію, яка виникає внаслідок пошарового формування. До того ж, сила адгезії між шарами матеріалу зазвичай є слабкішою, ніж усередині шару. Похибки формування поверхонь, усадка матеріалу та час виготовлення (який визначається висотою виробу вздовж вісі Z та кількістю шарів) також залежать від напрямку побудови.

Один зі способів значного підвищення продуктивності для ряду адитивних методів (SLA, SLS і т. д.) полягає в структурній декомпозиції виробу та виготовленні щільно розташованої композиції його складових частин за мінімальну кількість завантажень установки [73, 118-122]. Зазвичай, структурну декомпозицію використовують для великогабаритних виробів, розміри яких перевищують розміри робочого простору установки. Порівняльний аналіз існуючих підходів щодо декомпозиції виробів розглянуто у роботі [123].

При створенні набору перетинів 3D-моделі, вибір стратегії нарізки визначає точність, якість поверхні та час побудови. Водночас, збільшення точності побудови досягається збільшенням кількості шарів, що призводить до збільшення часу виготовлення. Відомі дослідження адаптивної стратегії нарізки [124, 125] показують, що оптимізація з використанням заданої похибки побудови дозволяє досягти балансу між точністю та часом виготовлення.

Задання параметрів і стратегії формоутворення шарів (наприклад для технологій SLS, SLM, SLA) це визначення траєкторії обходу треків променем

лазера) впливає на час побудови і фізико-механічні властивості матеріалу виробу [126-130]. Траєкторія обходу треків променем лазера задається на основі визначення геометрії треків (лінійних і криволінійних ділянок переміщення плями лазерного променя), порядку обходу їх і параметрів процесу формоутворення (наприклад, швидкості потоку і діаметра сопла для процесу осадження, потужності лазера для процесу спікання і т. д.) [131, 132]. Рішення даної задачі пов'язано з обчислювальними і технологічними аспектами підготовки АМ-процесів.

1.5.3 Раціональна орієнтація виробу в робочій області побудови

Раціональна орієнтація виробу в робочій області побудови установки визначається шляхом проведення аналізу вихідної 3D-моделі з урахуванням стратегії формування шарів з постійним або змінним кроком побудови. Для цього необхідно виконати аналіз тріангуляційної моделі (STL-файлу) або CAD-моделі виробу. Результатом цієї операції є матриця перетворення для системи координат 3D-моделі виробу. Її застосування до вихідної 3D-моделі дозволяє отримати раціональну орієнтацію відносно координатної осі Z (напрямку побудови), що істотно впливає на більшість факторів процесу пошарової побудови. Вибір критерію оптимізації залежить від використованого АМ- методу. Наприклад, для SLA, SLM і FDM методів вибір варіанту орієнтації здійснюється з урахуванням таких найбільш важливих факторів, як мінімізація часу побудови (кількість шарів) або об'єму допоміжних структур (підтримок).

Для багатьох адитивних технологій висота виробу по осі Z є ключовим фактором, що безпосередньо впливає на час та собівартість деталі. Припускається, що час виготовлення одного шару є практично постійним за одинакових умов формоутворення та незалежно від складності та площин перетину формотворного матеріалу у шарі (це особливо відноситься до SLA, SLM і DLP методів). Отже, час виготовлення залежить від кількості шарів. Однак залежність часу виготовлення від кількості шарів залежить від стратегії пошарової побудови (нарізки 3D-моделі).

Низька якість поверхонь, зокрема на важливих (відповідальних) ділянках,

збільшує час, необхідний для остаточної обробки (постобробки), та відповідно збільшує вартість виготовлення.

Критеріями якості поверхонь отриманого виробу можуть бути статистичні характеристики показників, що залежать від орієнтації, такі як:

- площа поверхонь найбільш схильних до ефекту "сходинок", що виникають через пошарову побудову;

- площа контакту виробу з платформою установки (для ряду способів виготовлення характерно значні відхилення форми і шорсткості базової поверхні);

- площа поверхні виробу, що контактує з опорною конструкцією, оскільки такі поверхні можуть мати підвищену шорсткість та дефекти поверхні [133];

- фізико-механічні властивості деталі, що виготовляється, оскільки пошарове виготовлення може призводити до анізотропії властивостей одержаних виробів [134];

- величина відхилень форми поверхонь [135] або показник шорсткості [136].

Проведений аналіз наукових досліджень дозволив ідентифікувати наступні основні фактори, які впливають на вибір оптимальної орієнтації виробу при пошаровій побудові:

- характеристики якості поверхні, час побудови, складність і об'єм структур підтримки нависаючих поверхонь [137, 138];

- кількість шарів формоутворення матеріалу [139, 140];

- висота виробу по координатній осі Z [141, 73];

- площа поверхонь граней, що прилягають до підтримуючих структур (площа граней тріангуляційної моделі з коефіцієнтом нормалі по осі Z – $N_Z < 0$ або $N_Z < N_{Zcr}$, де N_{Zcr} – критичне значення, що визначає поверхні для яких необхідна підтримка) [141];

- похибка поверхні (площа граней з нормальними не перпендикулярних і не паралельних осі Z , тобто $|N_Z| \neq 1$ і $N_Z \neq 0$ [139, 140], площа граней з нормальними $|N_Z| = 1$ і $N_Z = 0$ [125], різниця за об'ємом 3D-моделі і готового виробу [141]);

- міцність виробу [141];
- оптимальне розміщення групи виробів в робочому просторі [142, 143].

Багатокритеріальна оптимізація орієнтації виробу при пошаровій побудові є предметом безлічі досліджень [137, 144, 145]. Незважаючи на значну кількість публікацій, присвячених даній проблемі [73, 125, 137-141], до цього часу відсутня методична основа для оцінки технологічності конструкції виробу з урахуванням вибору раціональної орієнтації. Таким чином, для вдосконалення конструкції виробу з точки зору вибору раціональної орієнтації, необхідно розробити спеціальну методику оцінки, яка враховуватиме особливості пошарової побудови.

1.5.4 Створення підтримуючих конструкцій при пошаровій побудові

Геометрія та об'єм підтримуючої конструкції визначаються на основі 3D-моделі виробу. Для прикладу, у випадку FDM генерація підтримки проводиться на основі даних зрізу, виходячи з величини нависання відносно контуру попереднього шару [109]. В деяких випадках конструкцію виробу коригують з метою зменшення поверхні, яка вимагає підтримки [107]. Наприклад, це може бути досягнуто шляхом зменшення товщини стінок та відповідного навантаження, яке призводить до деформації виробу.

Необхідною умовою при побудові підтримуючої конструкції є забезпечення мінімальних відхилень форми виробу під дією своєї ваги. Достатньою умовою є створення конструкції мінімальної за обсягом.

Розрізняють підтримуючі конструкції за своїм розміщенням: внутрішні і зовнішні. Для підтримки нависаючих елементів створюються зовнішні опори, для підтримки верхніх частин порожніх елементів виробу - внутрішні опори. Грані тріангуляційної 3D-моделі, з негативною складовою вектора нормалі щодо осі Z, потенційно потребують зовнішніх опор. Однак при використанні більшості адитивних методів для виступів розміром менше ширини треку матеріалу немає необхідності в їх підтримці. Тому дана задача потребує вирішення на основі багатокритеріальної оптимізації і комплексного вирішення технологічних задач [146, 147].

Аналіз відомих підходів до оптимізації підтримуючих конструкцій розглянуто у роботі [148]. На практиці використовують наступні підходи щодо розробки підтримуючих конструкцій:

- групування векторів нормалей граней тріангуляційної моделі за кутом нахилу відносно осі Z [149, 150];
- імітація побудови 3D-моделі [151];
- аналіз зміщення контурів суміжних шарів [150, 152, 153];
- контроль товщини стінок у конструкції виробу [154];
- підбір стратегії формування шарів [155];
- аналіз відхилень поверхні та фізико-механічних властивостей [156].

Найбільш інформативним і перспективним видається пошаровий аналіз 3D-моделей виробів для вироблення рекомендацій щодо створення підтримуючих конструкцій.

1.5.5 Стратегія розсічення (нарізки) 3D-моделі виробу

Стратегії нарізки (розсічення) можна класифікувати за типом кроку, що використовується при побудові пошарової моделі. Існують стратегії з постійним та змінним кроком побудови. У випадку змінного кроку побудови крок визначається з урахуванням певного критерію, що базується на аналізі поточного шару 3D-моделі. Після процедури нарізки 3D-моделі отримується набір контурів перетинів та відповідних значень товщини шару.

Одиничний зріз полігональної 3D-моделі виробу (STL-файлу) утворюється шляхом перетину горизонтальною площиною XY. Рішення даної задачі має дві проблеми. Перша проблема - визначення товщини шару (кроку побудови), друга - пов'язана з визначенням геометрії контуру.

Звичайна стратегія нарізки здійснюється при постійному кроці побудови, тобто при однаковій товщині всіх шарів [157]. Такий підхід не враховує особливості геометрії виробу і, отже, призводить до зниження точності виготовлення. Адаптивні стратегії, засновані на використанні змінного кроку побудови, розробляються з метою усунення даного недоліку [124].

Аналіз відомих наукових досліджень дозволив виявити наступні підходи

щодо реалізації стратегій нарізки:

- розсічення STL-файлу виробу (полігональної 3D-моделі) набором площин, що рівномірно розташовані, з використанням кусково-лінійних кривих для опису контуру перетину [158-160];
- адаптивне розсічення STL-файлу з використанням кусково-лінійних кривих для опису контуру перетину [139, 161, 162];
- адаптивне розсічення CAD-моделі з використанням кусково-лінійної апроксимації контуру [163-166];
- рівномірне або адаптивне розсічення CAD-моделі з точним або приблизним аналітичним описом контуру за допомогою кривих ліній [167-169].

1.5.6 Стратегія формоутворення шару

Стратегія формоутворення визначає траєкторію рухів (сопла, плями лазерного променя і т. д.) в процесі формування шару матеріалу. Траєкторія рухів відповідає конфігурації треків (лінійних і криволінійних). При цьому вони розрізнюються по характеру формоутворення: внутрішні (для утворення внутрішнього матеріалу виробу) і зовнішні (для утворення поверхонь виробу). Геометрія внутрішніх траєкторій (розташування та розміри треків) і параметри формоутворення (наприклад, діаметр плями лазерного променя, потужність лазерного випромінювання, швидкість переміщення і т. д.) впливає на фізико-механічні властивості одержаного виробу. Зовнішня траєкторія і параметри формоутворення (наприклад, величина зсуву треку від контуру, число проходів і т. д.) визначає точність і шорсткість одержаних поверхонь виробів.

Стосовно до SLS використовуються еквідистантні та растрові стратегії. Але відомі й інші стратегії зі спіральними, криволінійними траєкторіями, наприклад, розроблені для FDM. Траєкторія за шаблоном "плетінка" для SLA дозволяє оптимізувати процес формоутворення. Стосовно до LOM і SGC через особливості процесу не мають стратегію формоутворення шарів. У LOM листи матеріалу ріжуться по контуру і склеюються. У SGC по всій площині шару виконується формування матеріалу шляхом впливу УФ-лампи.

На сьогодні розроблено велику різноманітність підходів до вирішення

проблем щодо визначення внутрішньої і зовнішньої траєкторії рухів в процесі формоутворення:

- створення растрової стратегії формоутворення на основі воксельної моделі [170] або шляхом визначення точок переривання прямолінійних треків руху [153, 171];
- підвищення точності побудови шляхом використання еквідистантних кусково-прямолінійних та криволінійних траєкторій [169, 172-174];
- визначення раціональної траєкторії на основі оптимального співвідношення точності і часу побудови [175];
- коректування траєкторії для мінімізації залишкових деформацій шляхом вибору напрямку треків [172], на основі імітаційних розрахунків [126] і аналізу експериментальних даних [176];
- оптимізація фізико-механічних властивостей (в основному розглядаються жорсткість і міцність) виробу [177, 178];
- поліпшення характеристик адгезії між шарами побудови шляхом прогнозування температурних процесів [179];
- вдосконалення зовнішньої траєкторії на основі одновимірної апроксимації контуру з використанням лазерного та водострумного різання [180, 181];
- вдосконалення зовнішньої траєкторії на основі двомірної апроксимації контуру та додаткової обробки кінцевими фрезами [182].

Огляд відомих стратегій формоутворення і їх оптимізації за різними критеріями розглянуто в роботі [183].

Результати аналізу вказують на суттєві прогалини в дослідженні впливу геометрії траєкторії на фізико-механічні властивості та усадку матеріалу виробу. Розробка стратегії формоутворення шару на основі багатокритеріальної оптимізації становить інтерес для дослідження.

1.5.7 Перспективні напрямки підвищення ефективності технологічної підготовки.

Розглядаючи в цілому технологічну підготовку АМ-процесів (виготовлення виробів адитивними технологіями) проглядається тісний

взаємозв'язок виконуваних задач. Такий взаємозв'язок проявляється в різних аспектах пошарового виготовлення виробів, у зв'язку з істотним впливом на виробничі фактори різних задач технологічної підготовки. Стратегія нарізки моделі (з постійною або змінною товщиною шарів) впливає на точність формоутворення поверхні, час виготовлення, а також фізико-механічні властивості виробів. Стратегія формоутворення шару (траекторія і напрямки робочих рухів) впливає на час побудови і фізико-механічні властивості. Орієнтація впливає практично на всі чинники. Об'єм підтримуючих конструкцій суттєво впливає на час виготовлення, шорсткість поверхонь, що контактиують з ними.

Ефективна реалізація задач (виконання оптимізаційних задач) технологічної підготовки можлива на основі єдиних критеріїв, які забезпечать високу точність і найменший час побудови з оптимальними фізико-механічними властивостями.

Задачу визначення раціональної орієнтації виробу необхідно виконувати за критерієм мінімізації неоднорідностей матеріалу або фізико-механічних властивостей. Задача стратегії формоутворення в даному випадку ускладняється використанням траекторій робочих рухів по кривих треках, які сегментують шар на області різних матеріалів або заданих властивостей [109].

Адитивні технології мають привабливу перспективу розвитку у формоутворенні композиційних матеріалів з точковим або пошаровим розподілом їх компонентів [184]. Зокрема, досить затребуваними є гібридні виробничі системи, які комбінують традиційні технології з адитивними. Проте, їх реалізація потребує вирішення широкого спектру проблем [185].

Розглянутий аналіз дає змогу зробити наступні висновки щодо розвитку адитивного виробництва складних виробів:

- рівень розвитку АМ-обладнання є достатнім, проте його низька ефективність потребує науково-обґрунтованої методології технологічної підготовки для досягнення більшої ефективності використання;

- наявні методологічні передумови та достатній об'єм експериментальних

даних дозволяють здійснювати реалістичне модельне дослідження ефективності виконання задач технологічної підготовки;

- при вирішенні задач технологічної підготовки необхідно виконувати оцінку складності виробу на основі статистичного аналізу характеристик елементів тріангуляційної 3D-моделі.

1.6. Вибір напрямків досліджень

Виходячи з викладеного в аналізі, визначена мета досліджень – це удосконалення методичних основ і розробка системи технологічної підготовки матеріалізації складних виробів для підвищення ефективності використання адитивних технологій.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити комплекс задач у наступних напрямках досліджень:

1. Проведення аналізу сучасного стану адитивних технологій та розробка у визначених напрямках підвищення їх ефективності на етапі підготовки проекту матеріалізації 3D-моделі.

2. Розробити систему технологічної підготовки матеріалізації складних виробів з включенням інструментів статистичного аналізу.

3. Розробити методологію оцінки складності конструкції промислових виробів (початкових тріангуляційних та похідних воксельних 3D-моделей), а також інструментів візуального статистичного аналізу розподілу досліджуваних ознак для ефективного вибору технологічних параметрів матеріалізації.

4. Сформулювати принципи ефективного використання робочого простору установок із забезпеченням раціонального поєднання заданої якості, точності і часу виготовлення.

5. Реалізувати розроблені принципи, які забезпечують підвищення ефективності адитивного виготовлення складних виробів.

РОЗДІЛ 2

ЗАГАЛЬНІ УМОВИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У цьому розділі обговорюються питання методології досліджень, загальні умови, обладнання та матеріали, використані в експериментах. Крім того, представлені методики аналізу тріангуляційних 3D-моделей промислових виробів та надано опис програмного забезпечення, використане під час виконання досліджень.

2.1 Методологія досліджень в системі технологічної підготовки матеріалізації складних виробів адитивними методами

При дослідженні можливостей технологічної підготовки матеріалізації складних виробів пошаровою побудовою з використанням методів адитивних технологій (AM-процесів) слід враховувати ймовірнісну природу складових технологічного процесу та особливо умов та параметрів формоутворення [15, 91]. Тому методологія досліджень повинна включати підходи прикладної статистики щодо аналізу технологічних параметрів та характеристик тріангуляційних 3D-моделей виробів.

У системі технологічної підготовки матеріалізації складних виробів адитивними методами передбачено інструменти дослідження з використанням прикладної статистики, а методологія дослідження повинна дозволяти вирішувати такі завдання:

- перетворювати (виконувати імпорт) STL-файлів моделей промислових виробів в базу даних геометричних характеристик (координат вершин та вектора нормалі) трикутних граней;

- виконувати пошаровий аналіз 3D-моделі виробу для оцінки геометричної складності та можливості виготовлення пошаровою побудовою;

- створювати воксельну 3D-модель виробу для виконання аналізу розподілу елементарних об'ємів в робочому просторі пошарової побудови для оцінки варіантів застосування структурної оборотної декомпозиції та використання робочого простору;

- виконувати колірну візуалізацію для задач перевірки коректності тріангуляційної 3D-моделі виробу, аналізу технологічності конструкції і прийняття рішень на етапі технологічної підготовки;
- на основі багатокритеріальної оцінки визначати раціональну орієнтацію виробу (область значень кутів повороту 3D-моделі);
- виробляти порівняльну оцінку ефективності різних варіантів розміщення 3D-моделей виробів в робочому просторі побудови;
- експортувати дані (із бази даних трикутних граней) підготовленої 3D-моделі виробу в формати: STL [79] (для матеріалізації з використанням традиційних технологій або *Additive Manufacturing*), AMF/PLY [78] (для візуалізації багатобарвної моделі) та XLS, CSV, TSV (для аналізу даних в сторонніх програмних продуктах в тому числі з використанням можливостей Machine Learning шляхом підключення інструментів бібліотеки CNTK [186] у розроблену систему);
- визначати статистичні характеристики розподілу досліджуваних ознак, що характеризують властивості тріангуляційної 3D-моделі виробу та технологічних процесів адитивних технологій;
- забезпечувати порівняльний аналіз розподілу досліджуваних ознак з використанням широкого ряду статистичних непараметричних критеріїв оцінки рівномірності.
- візуалізувати і протоколювати вихідні дані та результати досліджень.

Комп'ютерна система технологічної підготовки створювалася в інтегрованому середовищі розробки *Microsoft Visual Studio*. Вибір середовища програмування визначився необхідністю створення достатньо складної системи, що має інструменти роботи з великими масивами даних.

Розробка системи технологічної підготовки реалізована на основі методології об'єктно-орієнтованого програмування (ООП). Програмний продукт, розроблений в рамках методології ООП, являє собою сукупність об'єктів (3D-моделей промислових виробів, трикутних граней 3D-моделі, вершин трикутної грані, вокселей, установок пошарової побудови та т. д.), які є

екземплярами певного класу, а класи утворюють ієрархію спадкування [187]. В основу ООП покладено такі принципи [187]: абстрагування, ієрархічність, модульність, інкапсуляцію (обмеження доступу), паралелізм, типізацію та збереженість (стійкість).

Побудова системи, що розробляється на основі ідей ООП дозволяє науково обґрунтовано вивчати підходи щодо вдосконалення технологічної підготовки матеріалізації складних виробів адитивними методами.

Розроблена комп'ютерна система являє собою в термінології ООП [188]:

- модель реального процесу (технологічної підготовки) або фізичного об'єкту (промислового виробу або установки пошарової побудови);
- модель містить тільки істотні для розроблювальної системи ознаки і властивості досліджуваного процесу;
- модель реального процесу або фізичного об'єкта описана як система взаємодіючих об'єктів;
- об'єкт описується наборами атрибутів (властивостей) і виконуваних операцій (методів виконання дій);
- взаємодія між об'єктами здійснюється обміном спеціальних повідомлень;
- отримане об'єктом повідомлення обробляється і виконується певна дія;
- об'єкти з однаковим набором атрибутів і операцій (методів виконання дій) відносяться до одного класу даного типу об'єктів.

Структурна схема об'єктної (параметричної) 3D-моделі промислового виробу та її перетворень, які виконуються в системі технологічної підготовки, представлена на рис. 2.1. Базовим об'єктом є тріангуляційна 3D-модель, яку одержують шляхом тріангуляції CAD-моделі промислового виробу. Тріангуляційна 3D-модель являє собою систему трикутних граней, котрі задаються координатами вершин і векторів нормалей поверхні. На основі даних, узятих з тріангуляційної 3D-моделі в залежності від виконуваних задач технологічної підготовки, створюються такі об'єкти:

- воксельна 3D-модель для аналізу щільності розподілу елементарних

Початкова CAD-модель промислового виробу

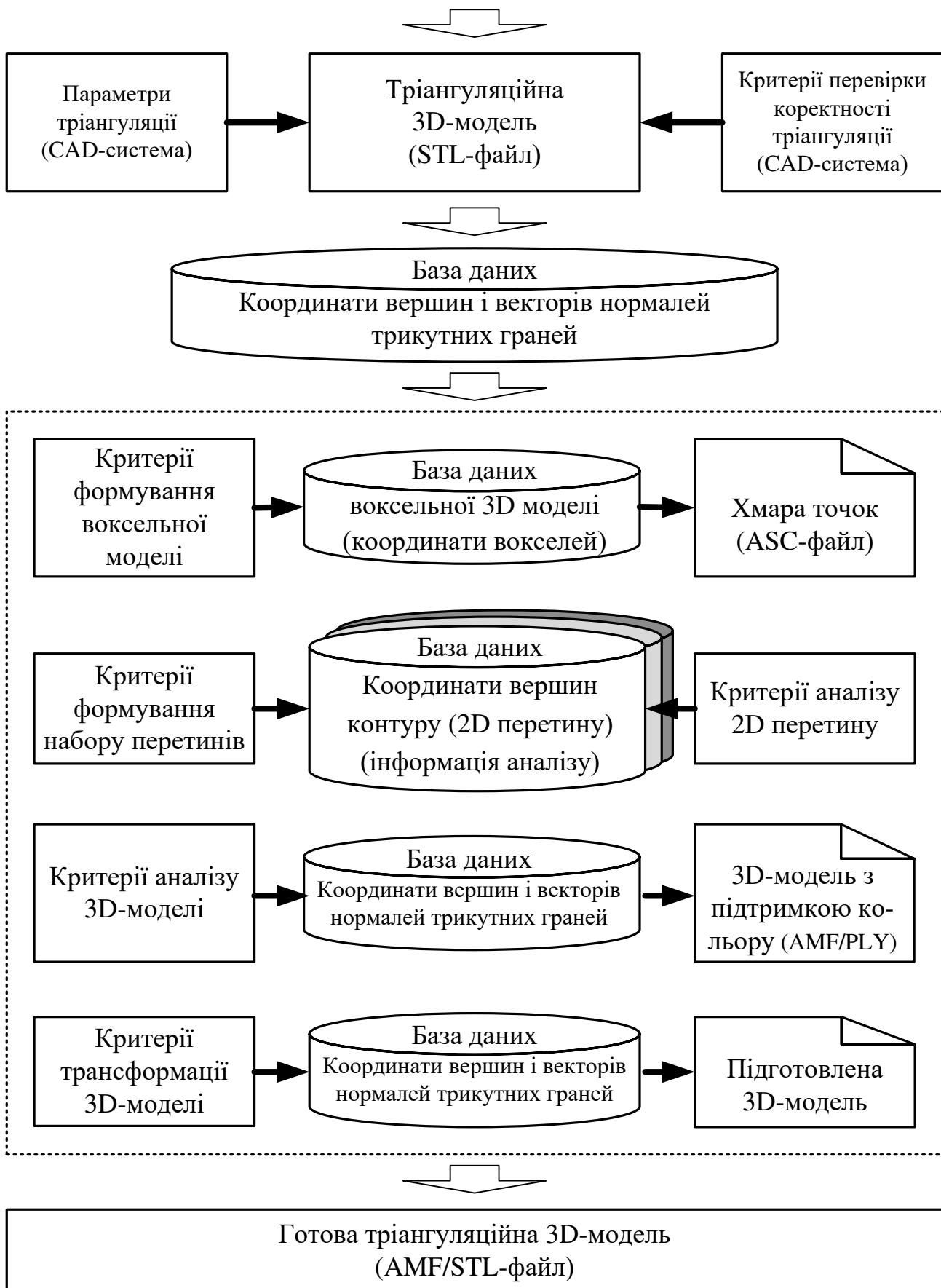


Рисунок 2.1 - Структурна схема перетворень 3D-моделі промислового виробу

- об'ємів виробу в робочому просторі пошарової побудови (ASC-файл);
- полігональна (тріангуляційна) 3D-модель з підтримкою кольору граней (AMF/PLY-файл);
 - пошарова 3D-модель з координатами шарів та вершин контурів перетинів (CSV-файл).

2.2 Загальні умови досліджень

Робота виконувалася на кафедрі інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка НТУ «ХПІ».

Методологія досліджень орієнтована на вивчення можливостей технологічної підготовки матеріалізації складних виробів для підвищення ефективності використання адитивних технологій. Вихідною інформацією для адитивних технологій є CAD-модель або полігональна (тріангуляційна) 3D-модель виробу. У разі використання CAD-моделі в якості вихідної геометричної інформації про виріб, тоді виконується перехід до тріангуляційної моделі з використанням CAD-системи. У дослідженнях використовувалися наступні CAD-системи: *PowerShape* (*Delcam*, на цей час *Autodesk*), *Solidworks* (*SolidWorks Corporation*) і *Magics* (*Materialise Software*).

Вихідна 3D-модель виробу може бути отримана на базі даних креслення, аналітичних залежностей, фотографій або хмар точок одержаних за допомогою вимірювальних систем. В якості основних вимог до тріангуляційної 3D-моделі твердотілого об'єкту виступають її замкнутість та зв'язність [189]. В якості додаткових вимог до тріангуляційних моделей виступає відсутність вироджених граней, а також випадків, коли вони накладаються та ін.

Недотримання наведених вимог до 3D-моделі промислового виробу призводить до виникнення помилок при виконанні задач технологічної підготовки АМ-процесів.

Матеріалізація 3D-моделі з використанням АМ-процесів (адитивних технологій) реалізується, як правило, шляхом виконання наступних основних етапів [73, 91]:

- проектування 3D CAD-моделі промислового виробу в CAD-системі;
- комп'ютерна візуалізація конструкції виробу з метою її контролю;
- доробка та оптимізація конструкції виробу у CAE або CAM системі;
- перетворення CAD-моделі виробу в STL-формат (полігональну модель);
- трансформація 3D-моделі з урахуванням рішення задач технологічної підготовки (структурна декомпозиція, масштабування, поворот і переміщення);
- проектування технологічних базових і підтримуючих конструкцій;
- підготовка до роботи АМ-установки (очищення відповідальних елементів, завантаження вихідного матеріалу, створення необхідних умов для середовища формоутворення, настройка процесу та оцінка тривалості пошарової побудови і т. д.);
- перетворення 3D-моделі в набір пошарових 2D-моделей (імітаційний контроль їх коректності);
- матеріалізація 3D-моделі шляхом пошарової побудови у вигляді готового виробу або його прототипу;
- процедура завершення роботи АМ-установки;
- контроль виробу відповідно до вимог щодо геометричних і фізико-механічних властивостей (попередня верифікація);
- коригування (у разі необхідності) 3D-моделі виробу або технології виготовлення;
- повторне одержання виробу з урахуванням виконаних коригувань;
- остаточна верифікація;
- доробка промислового виробу (постпроцеси) в разі необхідності.

Етапи контролю, оптимізації конструкції і верифікації в процесі матеріалізації 3D-моделі у виріб необхідні для максимального зменшення можливості виникнення помилок і відхилень на етапах конструкторської та технологічної підготовки.

Необхідною умовою для використання адитивних технологій є наявність CAD або тріангуляційної 3D-моделі промислового виробу. Достатньою умовою є 3D-модель з коректною тріангуляцією і оптимізованою конструкцією під

особливості процесу формоутворення пошаровою побудовою. Розробляється оптимізована конструкція виробу (3D-модель) і виконується перевірка коректності тріангуляції в універсальних або спеціалізованих CAD-системах.

Як правило, програмне забезпечення AM-установок використовує вихідні дані в двох форматах - STL та SLC (Slice). Процес трансляції даних 3D-моделі в STL-файл виконується в CAD-системі автоматично. Файл SLC-формату описує набір 2D-перетинів (контурів) для AM-установок. Отримують SLC-файл на базі STL-файлу з використанням спеціалізованого програмного забезпечення (наприклад, *KISSlicer*). У розробленій системі технологічної підготовки реалізована власна підсистема для формування та аналізу пошарової моделі з 2D-перетинами (опис в розд. 4, 5).

2.3 Застосуване обладнання та матеріали

Лабораторія кафедри "Інтегровані технології машинобудування" ім. М.Ф. Семка НТУ "ХПІ" оснащена 3D-принтерами *Ultimaker 3 Extended*.

2.3.1 3D-принтер *Ultimaker 3 Extended*.

Принтер *Ultimaker 3 Extended* реалізує FDM-метод пошарової побудови виробів з використанням термопластику. Дано модуль 3D-принтеру відноситься до настільних 3D-принтерів з двома екструдерами. Зовнішній вид та робочий простір побудови з платформою 3D-принтеру представлено на рис. 2.2.

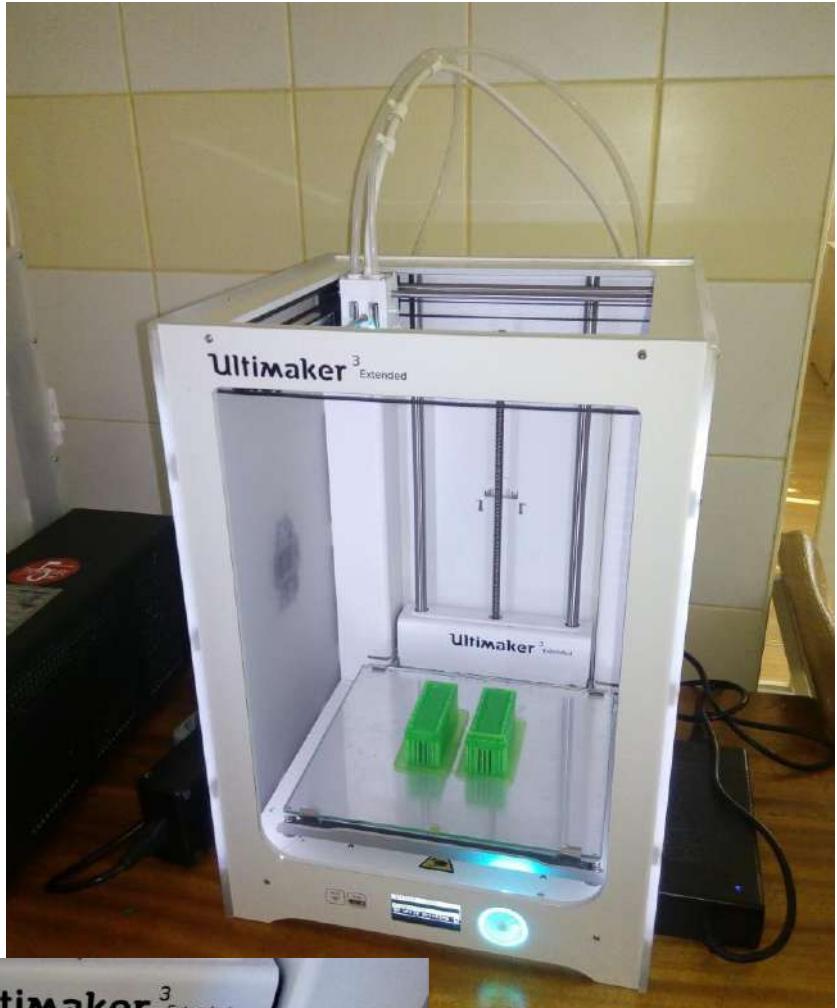
Основні особливості даного 3D-принтеру:

- автоматичне калібрування робочої платформи при кожному запуску програми побудови;
- наявність двох екструдерів, завдяки яким стає доступним пошарова побудова двома кольорами / типами матеріалів. Така комплектація дозволяє друкувати з матеріалом підтримки, що розчиняється;
- друк різними видами пластику завдяки екструдерам з широким діапазоном робочих температур.

Технічні характеристики *Ultimaker 3 Extended*:

- робочий простір побудови – 197x215x300 мм;

Зовнішній
вигляд



Робоча платформа



Рисунок 2.2 – Принтер Ultimaker 3 Extended

- швидкість 3D-друку – до 16 $\text{мм}^3/\text{с}$;
- точність друку по осіах X , Y , Z – 12,5; 12,5; 2,5 $\mu\text{м}$;
- діаметр сопла – 0,25; 0,4; 0,8 мм ;
- максимальна температура нагріву екструдерів – 280°C;
- максимальна температура нагріву робочого столу – 110°C;
- крок побудови (висота шарів) – 0,06÷0,40 мм ;
- матеріали для друку - ABS, PLA, CPE, PE, PP, PC, PVA, TPU, Carbon, Nylon, Silicone та ін.

2.3.2 Система селективного лазерного спікання.

Система селективного лазерного спікання на базі установки *Vanguard Si2 SLS* (рис. 2.3) призначена для адитивного виготовлення кінцевого виробу (без стадії отримання моделі прототипу). Основні характеристики установки наведено в табл. 2.1 [190].

Таблиця 2.1 – Основні технічні характеристики установки *Vanguard Si2 SLS*

Характеристики	Параметри
Максимальна потужність лазерної системи CO ₂	100 Вт
Розмір плями лазерного променю	0,47 мм
Точність побудови за координатними осями X , Y	0,178 мм
Товщина шару побудови	0,076÷0,500 мм

Система селективного лазерного спікання включає установку *Vanguard Si2 SLS* (3D Systems, США), охолоджувач, станцію відливу BOS, високотемпературну піч Laser Oven, систему забезпечення газоподібним азотом і змішувач порошків.

В установці *Vanguard Si2 SLS* передбачено два режими роботи – стандартний (з високою роздільною здатністю) і продуктивний (в 2 рази дозволяє зменшити час побудови за рахунок більшого кроку). Швидкість сканування змінюється в межах 7,5÷10 $\text{м}/\text{с}$. Робочий простір порівняно з 3D-принтером *Ultimaker 3 Extended* більше – 381x330x457 мм ($XxYxZ$).



Зовнішній вигляд



Завантажена ліва ємність порошком

Рисунок 2.3 – Установка селективного лазерного спікання Vanguard Si2 SLS

На рис. 2.4 продемонстровано основні етапи процесу формоутворення на установці *Vanguard Si2 SLS*: первісна подача порошку, вирівнювання шару після проходу ролика, процес спікання і подальший прохід ролика для нанесення матеріалу для наступного шару.

У вакуумній камері виконуються роботи з робочими сумішами.

Охолоджувач, як допоміжний агрегат, призначений для відведення тепла від лазерної системи.

Станція відризу BOS призначена для очищення отриманого виробу від зайвого порошку з метою подальшої інфільтрації і повторного використання. Змішувач порошків дозволяє змішувати новий з використаним, що залишився в робочій області побудови після формоутворення.

Високотемпературна (до 1070°C) піч *Laser Oven* - призначена для спікання металевих і керамічних порошків, випалювання сполучної речовини, розплавлення бронзи та інфільтрації.

2.3.3 Система сканування на базі оптико-цифрової установки *Imetric Iscan*

Одержання 3D-моделей на основі фізичного прототипу виробу виконувалось шляхом оптико-цифрового сканування. Таке 3D-сканування має ряд переваг в порівнянні з іншими відомими методами [112]:

- відсутність контакту з вимірюваною поверхнею;
- висока точність вимірювання криволінійних поверхонь;
- можливість роботи з об'єктами з пластичних матеріалів (наприклад з глини, пластиліну та ін.).

Задачі контролю геометрії готових виробів і зворотний інженіринг фізичного прототипу з метою отримання вихідної 3D-моделі виконувалися з використанням оптико-цифрової установки об'ємного сканування *Imetric IScan II* [113].

Загальний вигляд оптико-цифрової установки об'ємного сканування IScan II (виробник Imetric, Швейцарія) представлено на рис. 2.5.

Установка *Imetric IScan II* складається з наступних елементів [191]:



Подача порошку в робочу область побудови. Перший прохід ролика, що вирівнює

Вирівняний шар порошку



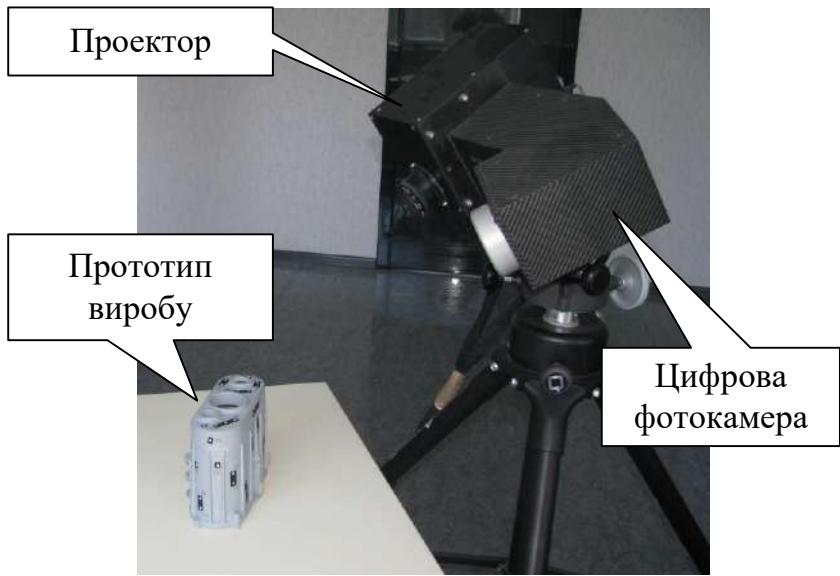
Процес спікання шару порошку



Процес вирівнювання шару порошку



Рисунок 2.4 – Етапи роботи установки селективного лазерного спікання Vanguard Si2 SLS



a)



b)

Рисунок 2.5 - Оптико-цифрова система сканування Imetric Iscan

- метрологічна фотокамера з традиційною оптикою (фокусна відстань 24 мм), з вбудованим фотоспалахом;

- фотограмметричне програмне забезпечення, що дозволяє виконувати наступні операції: розпізнавання образів за допомогою фотокамери, автоматичне вимірювання об'єкта з наклеєними світлоконтрастними мішенями, ідентифікацію мішень, створення систем вимірювальних точок та їх автоматичну орієнтацію, трансформація і редагування координат систем вимірювальних точок, аналіз геометрії, візуалізація і передача (експорт) даних в CAD-системи.

- допоміжне оснащення системи *Imetric IScan II*, що включає комплект світлоконтрастних мішень різних діаметрів, набір вуглеволоконних стандартних стрижнів з мішенями, покритими світловідзеркалюючим матеріалом та ін.

Установка дозволяє сканувати прототипи виробів з габаритними розмірами не менше 100×100×100 мм. Перед скануванням виконується спеціальна процедура настроювання, а також при необхідності калібрування. Для прототипів порівняно невеликих розмірів (до 300 мм) сканування може виконуватися на калібрувальній пластині або з використанням допоміжного об'єкту з наклеєними мішеньми, розташованого поблизу прототипу. При скануванні великоважливих прототипів світлоконтрастні мішенні наклеюються безпосередньо на їх поверхні.

На якість сканування істотно впливають властивості поверхні прототипу щодо відбиванню світла. Тому, як правило, на прототип перед скануванням наносять покриття, що має низький рівень відблиску. Відповідно необхідно приділяти значну увагу (при налаштуванні фотокамери) на інтенсивність навколошнього освітлення тому, що виникнення відблисків на поверхні призводить до появи у відповідних місцях розривів поверхні на 3D-моделі.

Система сканування *IScan II* дозволяє за прийнятний час (кілька хвилин або годин в залежності від складності виробу) виконувати сканування прототипу з отриманням системи точок (хмари точок) поверхні і автоматичною реєстрацією їх в єдину систему координат.

Методика роботи на установці *Iscan II* включає наступні етапи [192]:

- *попередні етапи:*

- нанесення покриття, що не дає відблиску (краща якість сканування забезпечується при використанні фарби сірого кольору);
- наклеювання світлоконтрастних мішеней;

- *етапи, що виконуються для кожного ракурсу сканування:*

- завдання положення головки сканування;
- налаштування процесу сканування (завдання порогу чутливості камери для процесів сканування і розпізнавання мішеней, автоматичне виявлення і інтерактивне завдання імен по кожній мішенні);
- процес сканування;
- отримання набору систем точок;
- візуальний аналіз поточної та/або загальної системи вимірюваних точок;

- *заключні етапи:*

- візуальний аналіз загальної системи вимірюваних точок;
- обрізка та / або видалення систем або груп хибних точок;
- збереження даних у ASC-форматі.

На основі досвіду експлуатації та рекомендацій [192, 193] можна сформулювати основні принципи раціональної стратегії 3D-сканування:

- об'єкт вимірюється з різних ракурсів (до 20÷30 зображень для виробів з розмірами до 400 мм);
 - в кожному новому зображені повинні фіксуватися як мінімум чотири мішенні з попередніх знімків та чотири нові мішенні (кращі результати одержували при їх загальній кількості 16÷20 на одному знімку);
 - скановані мішенні повинні одночасно потрапляти в робочі зони камери і проектора;
 - отримані системи вимірюваних точок повинні охоплювати всю поверхню прототипу, забезпечуючи наявність загальних ділянок поверхні для різних ракурсів вимірювання (бажано до 5-и, але для ділянок, де виявляється висока похибка вимірювання, слід видаляти хибні системи точок);

- сканування з різних ракурсів виконується обов'язково при одній відстані до поверхні прототипу. При цьому кожний вимір має охоплювати якомога більшу площа поверхні, забезпечуючи найбільшу кількість задіяних мішеней;
- одержані системи вимірюваних точок зберігати у один файл та окремо по кожному скануванню для можливості забезпечення програмної взаємної орієнтації з мінімальною похибкою.

Обробка отриманих даних. Для обробки даних сканування, одержаних на установці IScan II, використовується спеціалізована система *Qspect*. Для кожного прототипу виробу в системі створюється новий проект і виконується сканування за допомогою майстра роботи зі сканером або імпортуються раніше отримані системи вимірюваних точок (ASC-файли).

У режимі зйомки з декількох ракурсів використовується автоматична обробка отриманих результатів з визначенням розташування всіх систем точок. Залежно від складності вимірюваного виробу деякі системи точок можуть отримати неточну або неправильну орієнтацію. Ці ненадійні системи точок видаляються або зберігаються в окремі файли для завдання правильного їх положення в спеціалізованих CAD-системах (*Geomagic Studio*, *PowerShape*, *Magics RP* або ін. [194]).

При необхідності використовуються інструменти редагування систем точок, аналізу і перетворення системи координат для досягнення на наступному етапі тріангуляції необхідної якості поверхні 3D-моделі. Потім створюється звіт за результатами проведених вимірювань, зберігається проект і підсумковий набір вимірюваних точок [113].

2.3.4 Матеріали для матеріалізації виробів

Практична реалізація результатів теоретичних досліджень представлена в розд. 6. Експериментальні дослідження виконувалися з використанням способу селективного лазерного спікання.

Для селективного лазерного спікання SLS застосовуються порошки з досить широкої гами матеріалів – від воску до алюмінію, сталі і кераміки. Основні типи матеріалів, що використовуються в системі селективного

лазерного спікання *Vanguard Si2 SLS* є безпечними і нетоксичними, легкі у використанні, зберіганні, утилізації та переробці.

В роботі використовувалися порошки поліаміду *DuraForm PA* і склонаповненого жароміцького поліаміду *DuraForm GF*. Ці нейлонові матеріали спеціально розроблено для термопластикових деталей, стійких до агресивних середовищ, що вимагають підвищеної якості поверхні [195].

Особливості матеріалу *DuraForm PA* наступні: висока якість поверхні; легкість механічної обробки; екологічна безпека; висока хімічна стійкість та низька абсорбція вологи; зберігає функціональні властивості при температурі до 100°C. Щодо матеріалу *DuraForm GF*: відносно висока жорсткість; висока зносостійкість; мінімальна усадка матеріалу; підвищена термостійкість – 135°C.

2.4 Слюсарна обробка виробів після матеріалізації (постпроцес)

Вироби, одержані за допомогою пошарової побудови, як правило, додатково піддаються механічній обробці для усунення недоліків адитивних технологій. До таких недоліків відносяться відносно висока шорсткість поверхонь, великі за величиною відхилення від правильної форми та ін. Основними причинами їх виникнення є нерівномірна усадка матеріалу і ефект "сходинок" на поверхні виробу.

Полірування поверхонь виробів забезпечувало зниження їх шорсткості.

При використанні порошкового матеріалу з поліамідів виконувалося очищення виробу від порошку у вакуумній станції відливу BOS. В піскоструминній камері забезпечувалося згладжування нерівностей на поверхні виробів зі складною геометрією. При необхідності (за результатами верифікації отриманого виробу) подальша обробка складних поверхонь виконувалася з використанням ручного електроінструменту.

2.5 Верифікація тріангуляційних 3D-моделей

В АМ-області вихідною інформацією про геометрію виробу є його тріангуляційна 3D-модель, яка є наближеним описом CAD-моделі.

Тріангуляційні моделі містять дані про поверхню виробу у вигляді системи пласких трикутних граней. Згідно загальноприйнятым вимогам, що пред'являються до тріангуляційних 3D-моделей, кожна ії грань повинна мати тільки три суміжні грані. Кожне ребро є загальним тільки для двох суміжних граней. Тільки в цьому випадку забезпечується замкнутість внутрішнього об'єму 3D-моделі.

При тріангуляції CAD-моделей промислових виробів можливе виникнення помилок. Імовірність появи помилок підвищується зі збільшенням геометричної складності моделі. Особливо це проявляється на моделях підвищеної точності, коли задаються малі величини допустимої похибки тріангуляції. Одним з пояснень такої тенденції є відомий взаємозв'язок збільшення кількості трикутних граней для опису поверхонь зі зменшенням похибки тріангуляції.

Помилки тріангуляції викликані особливостями застосовуваних процедур апроксимації поверхонь CAD-моделі виробу [196]. Кількість дефектів у вихідній тріангуляційної 3D-моделі залежить від ефективності та надійності алгоритму перетворення (перехід від аналітичного до тріангуляційного опису поверхонь) [204]. Типовими дефектами тріангуляції є [91, 196]:

- несуцільна поверхня або порушення суміжності ребер трикутної грані (найбільш критичний дефект, так як призводить до суттєвих відхилень від правильної форми поверхонь);
- геометричне виродження трикутної грані (її вершина лежить на ребрі іншої грані);
- топологічне виродження (дві або три вершини збігаються або мають відносно близьке розташування);
- інвертовані вектори нормалей трикутних граней;
- взаємний перетин граней.

Несуцільна поверхня означає відсутність однієї або більше граней тріангуляційної 3D-моделі. Для вирішення задачі визначення відсутніх граней у разі розривів поверхні необхідне створення списку ребер. Рішення даної задачі

можливе за допомогою визначення кількості суміжних граней для кожного ребра. Суміжність ребер не рівна двом буде вказувати на наявність розривів поверхні 3D-моделі [91].

Виявлення і виправлення дефектів тріангуляційної 3D-моделі виконувалося в системі *Magics RP (trial version)* [197] і системі морфологічного аналізу 3D-образів виробів, розробленій на кафедрі "Інтегровані технології машинобудування" НТУ "ХПІ" [198].

Задача визначення коректності тріангуляційних 3D-моделей виробів на попередньому етапі технологічної підготовки дозволить виключити можливість виникнення похибок і проблем при виконанні наступних задач. Якість 3D-моделі визначає в кінцевому підсумку ефективність використання часових, фінансових та виробничих ресурсів. Розроблені в роботі [91] методики визначення коректності 3D-моделей виробів не дозволяють оцінити якість їх тріангуляції з урахуванням особливостей пошарової побудови і, відповідно, рівень підготовленості до матеріалізації. Тому для цієї мети розроблено спеціальні методики з оцінки якості (представленої у розд. 2.6) та геометричної складності (розд. 3) тріангуляційної 3D-моделі виробу.

2.6 Методика визначення якості тріангуляційної 3D-моделі виробу

Складність кількісної оцінки якості тріангуляційної 3D-моделі виробу визначається безліччю факторів, що її характеризують. Якщо розглядати якість тріангуляції з точки зору використання 3D-моделі для матеріалізації адитивними технологіями, то важливим є не тільки враховувати кількість дефектів. Запропоновані в існуючих CAD-системах кількісні показники носять малу інформативність, особливо при порівнянні моделей, отриманих при різних параметрах тріангуляції. Розглянемо на прикладі тріангуляційної моделі виробу "Пресформа 4609СБ" (показана на рис. 2.6) особливості аналізу дефектів. Модель отримана за даними 3D-сканування фізичного прототипу. Результати аналізу впливу кількості граней 3D-моделі на її якість (кількість дефектів) представлені в табл. 2.2 і 2.3.

Таблиця 2.2 - Кількість дефектів тріангуляційної моделі, що визначалися в програмі Geomagic Wrap

Задається кількість граней	Фактична кількість граней 3D-моделі	Кількість дефектів (перетин граней)	Кількість дефектів після автоматичного виправлення	Кількість розривів поверхні
20 000	20 002	25	17 (0)	11
30 000	29 996	68	25 (0)	11
50 000	50 000	162	67 (9)	11
100 000	99 999	192	6 (0)	15
200 000	200 000	303	101 (0)	13
300 000	299 999	303	115 (0)	12
500 000	424 953	253	125 (16)	19

Таблиця 2.3 - Кількість дефектів тріангуляційної моделі, що визначалися в програмі Magics

Кількість граней в моделі	Площа моделі, мм^2	Кількість дефектів		Кількість зайвих оболонок	Кількість розривів поверхні
		перетину граней	граней, що накладаються		
20 002	9921,753	20 (46)	5 (7)	1 (0)	2 (0)
29 996	9940,295	63 (61)	9 (9)	1 (0)	1 (0)
50 000	9976,354	143 (135)	13 (11)	4 (0)	2 (0)
99 999	9973,405	169 (144)	4 (4)	1 (0)	3 (0)
200 000	9990,978	271 (254)	11 (9)	1 (0)	5 (0)
299 999	9981,265	264 (239)	6 (4)	1 (0)	3 (0)
424 953	9969,061	229 (214)	13 (13)	1 (0)	7 (0)

Примітка. Значення досліджуваних ознак, наведених в дужках, отримані після використання програмних інструментів по усуненню дефектів моделі.

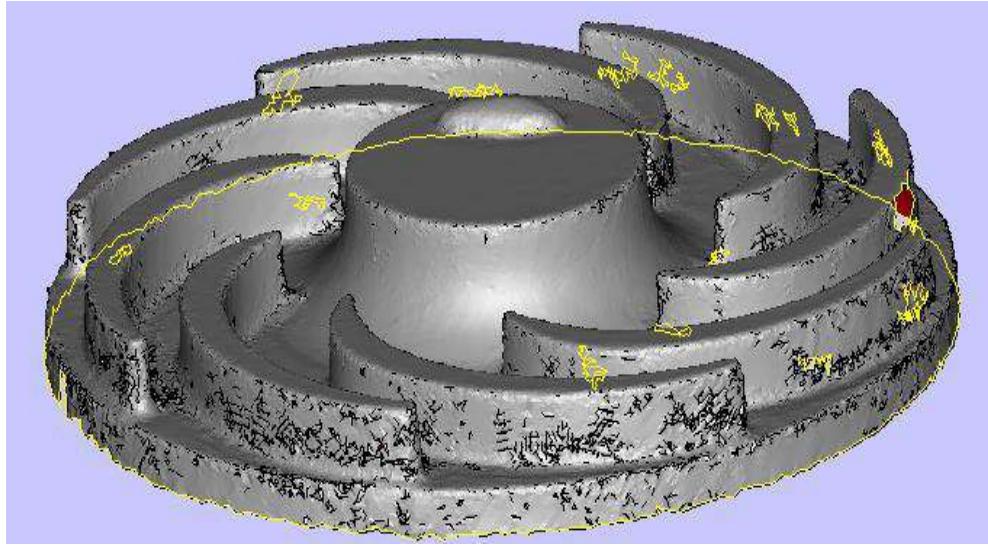


Рисунок 2.6 – Тріангуляційна 3D-модель виробу з 425 тис. граней

Дані, що представлені в табл. 2.2 і 2.3, підтверджують неможливість достовірної (однозначної) оцінки якості тріангуляційної 3D-моделі. Зі збільшенням кількості граней в 3D-моделі збільшується кількість дефектів. При цьому не враховується відносна їх кількість, загальна зміна розмірів (довжин ребер, площі) трикутних граней з дефектами. Тому запропоновані характеристики якості можна віднести до необхідних показників, але не достатнім для порівняльного аналізу з урахуванням параметрів тріангуляції і геометричних особливостей 3D-моделей.

Об'єм 3D-моделі виробу є цілком презентабельною характеристикою, так як визначає собівартість виготовлення [199, 200]. Різниця об'ємів вихідної тріангуляційної 3D-моделі і готового виробу визначає похибки форми від правильної форми і об'єму робіт по усуненню відхилень [141]. Об'єм використовується також для визначення правильної орієнтації нормалей трикутників (їх узгодженості) [91]. Тому одним з показників ефективності матеріалізації адитивними технологіями може бути коефіцієнт відносного відхилення об'єму, що визначається за наступною залежністю:

$$\Delta_V = \frac{|V_{Model} - V_{Part}|}{V_{Model}}, \quad (2.1)$$

де V_{Model} – об'єм вихідної 3D-моделі; V_{Part} – об'єм виробу.

Об'єм тріангуляційної 3D-моделі [201] визначається як сума об'ємів тетраедрів $T_{(i)}$ із загальною вершиною, в якості якої може служити початок системи координат, і основою у вигляді трикутної грані:

$$V = \sum_i^{N_{Face}} V_{T(i)}, \quad (2.2)$$

де $V_{T(i)}$ – об'єм тетраедра з основою i -ї грані; N_{Face} – кількість граней тріангуляційної 3D-моделі виробу.

На основі кожної грані тріангуляційної 3D-моделі будується тетраедр $T_{(i)}$ з вершиною в точці $O(0, 0, 0)$. Об'єм тетраедра визначається за такою формулою [202]:

$$V_{T(i)} = \frac{1}{6} (x_{i1}y_{i2}z_{i3} - x_{i1}y_{i3}z_{i2} - x_{i2}y_{i1}z_{i3} + x_{i2}y_{i3}z_{i1} + x_{i3}y_{i1}z_{i2} - x_{i3}y_{i2}z_{i1}), \quad (2.3)$$

де $x_{i1}, y_{i1}, z_{i1}, x_{i2}, y_{i2}, z_{i2}, x_{i3}, y_{i3}, z_{i3}$ – координати вершин трикутної грані.

Виходячи з можливостей кількісної оцінки дефектів тріангуляційної 3D-моделі [91, 198], існуючих принципів призначення показників, що характеризують технологічність конструкції виробу в машинобудуванні [68, 69, 71, 203] і підходів щодо нормування [204, 205], визначено основні коефіцієнти якості. Пропонуються наступні коефіцієнти, що визначають якість тріангуляційної 3D-моделі.

Загальний коефіцієнт якості тріангуляційної 3D-моделі, що характеризує наявність дефектів утворених через відсутність суцільної поверхні:

$$K_{Adj_edge} = 1 - \frac{N_{Face(n_{Adj_edge}=1)}}{N_{Face}}, \quad (2.4)$$

де $N_{Face(n_{Adj_edge}=1)}$ – кількість трикутних граней, що мають ребра з показником суміжності $n_{adj_edge} = 1$; N_{Face} – кількість граней.

Коефіцієнт K_{Adj_edge} , що визначається за залежністю (2.4) є не досить зручним для порівняльного аналізу, якщо не враховувати допустиму похибку тріангуляції Δ_{Smax} , яка задавалася в CAD-системі при створенні 3D-моделі. Тому

додатково представляє інтерес визначати такі показники: сумарний периметр розривів поверхні P_{Sum_Hole} , кількість розривів N_{Hole} та їх питому площеу S_{Sum_Hole} . Показники P_{Sum_Hole} і S_{Sum_Hole} для порівняльного аналізу 3D-моделей, отриманих при різних параметрах тріангуляції. Показники S_{Sum_Hole} і N_{Hole} та їхнє співвідношення для оцінки впливу на якість одержання замкнутих контурів при пошаровому розсіченні 3D-моделі.

Коефіцієнт, що характеризує наявність дефектів, утворених через відсутність суміжності ребер трикутної грані $n_{adj_edge} > 2$ (в основному виникає при тріангуляції системи вимірювальних точок):

$$K_{Adj_edge>2} = 1 - \frac{N_{Face(n_{Adj_edge}>2)}}{N_{Face}}, \quad (2.5)$$

де $N_{Face(n_{Adj_edge}>2)}$ – кількість трикутних граней, що мають ребра з показником суміжності $n_{adj_edge} > 2$.

Коефіцієнт, що характеризує наявність дефектів через геометричне або топологічне виродження трикутних граней (площа такої грані дорівнює нулю або менше допустимої величини Δ_{Sd}):

$$K_{Face_deg} = 1 - \frac{N_{Face(S=0)}}{N_{Face}}, \quad (2.6)$$

де $N_{Face(S=0)}$ – кількість трикутних граней з площею менше заданої Δ_{Sd} .

У разі, коли 3D-модель виробу містить множину оболонок, CAD-системи можуть не забезпечувати коректну орієнтацію трикутних граней окремих оболонок. Тому коефіцієнт, що характеризує коректну орієнтацію нормалей трикутних граней представляє інтерес для виявлення подібних "негараздів". Вектор нормалі трикутника вказує на приналежність поверхні 3D-моделі зовнішній або внутрішній стороні. При створенні набору перерізів по тріангуляційній 3D-моделі на підставі інформації щодо нормалей граней, що попали у поточний шар, визначаються області формоутворення матеріалу.

У файлі STL-формату для кожної трикутної грані перераховано координати вершин в певному порядку. З урахуванням цього порядку керуюча

система установки пошарової побудови визначає коефіцієнти напрямних косинусів грані N_x , N_y , N_z . Тому наведені у файлі коефіцієнти N_x , N_y , N_z є "надлишковими".

Перевірку правильності орієнтації можна визначати з урахуванням значень коефіцієнтів (напрямних косинусів) векторів нормалей, одержаних за наступними залежностями [206]:

$$N_{x,i} = \frac{A_i}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2 + C_i^2}}, \quad N_{y,i} = \frac{B_i}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2 + C_i^2}}, \quad N_{z,i} = \frac{C_i}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2 + C_i^2}}, \quad (2.7)$$

де A_i , B_i , C_i – коефіцієнти рівняння площини, що проходять через вершини v_1 , v_2 , v_3 для p_i грані,

$$\begin{aligned} A_i &= (p_i \cdot v_2 \cdot y - p_i \cdot v_1 \cdot y)(p_i \cdot v_3 \cdot z - p_i \cdot v_1 \cdot z) - (p_i \cdot v_3 \cdot y - p_i \cdot v_1 \cdot y)(p_i \cdot v_2 \cdot z - p_i \cdot v_1 \cdot z), \\ B_i &= (p_i \cdot v_1 \cdot x - p_i \cdot v_3 \cdot x)(p_i \cdot v_2 \cdot z - p_i \cdot v_1 \cdot z) - (p_i \cdot v_2 \cdot x - p_i \cdot v_1 \cdot x)(p_i \cdot v_3 \cdot z - p_i \cdot v_1 \cdot z), \\ C_i &= (p_i \cdot v_2 \cdot x - p_i \cdot v_1 \cdot x)(p_i \cdot v_3 \cdot y - p_i \cdot v_1 \cdot y) - (p_i \cdot v_3 \cdot x - p_i \cdot v_1 \cdot x)(p_i \cdot v_2 \cdot y - p_i \cdot v_1 \cdot y). \end{aligned}$$

Коефіцієнт, що характеризує наявність дефектів через неправильний напрямок нормалі граней, слід визначати з урахуванням їх відносної площі за наступною залежністю:

$$K_{Face_inv} = 1 - \frac{\sum S_{Face_inv}}{S_{Face}}, \quad (2.8)$$

де S_{Face_inv} – площа з неправильною орієнтацією трикутних граней; S_{Face} – загальна площа трикутних граней 3D-моделі.

Дефекти, викликані взаємним перетинанням граней, приводять до проблеми визначення коректного контуру моделі в січній площині, тобто без самоперетинів. Задача визначення подібних дефектів не має однозначної постановки умов для її вирішення. Кількість граней, що перетинаються виявляється для тріангуляційної 3D-моделі в сторонніх програмних продуктах – *Magics* і *Geomagic Studio*. Досвід застосування даних систем показує практично у всіх випадках розбіжності за результатами аналізу дефектів. Даний факт додатково підтверджує складність даної задачі для отримання надійного

рішення.

Задача виявлення перетину граней вирішувалася при визначенні контуру в січній площині для виключення утворення перетинних ділянок – "петель".

Запропоновані показники якості тріангуляційних моделей дозволяють виконувати порівняльну оцінку CAD-систем за їх можливостями тріангуляції складних за геометрією 3D-моделей виробів.

2.7 Система комп'ютерного аналізу, верифікації та трансформацій тріангуляційних 3D-моделей виробів

Попередня верифікація 3D-моделей промислових виробів виконувалася в комп'ютерній системі морфологічного аналізу тріангуляційних 3D-моделей. Систему розроблено на кафедрі "Інтегровані технології машинобудування" ім. М.Ф. Семка НТУ "Харківський політехнічний інститут" [91, 198].

Система морфологічного аналізу дозволяє вирішувати наступні основні задачі:

- створення базових елементів поверхонь для відпрацювання методологічних підходів щодо формування тріангуляційних елементів і створення складних математично заданих поверхонь;
- топологічний і морфометричний аналіз 3D-моделей [198, 207];
- виконання деформацій 3D-моделей для рішення задачі технологічної компенсації усадки матеріалу виробу [208];
- аналіз 3D-моделей для рішення задачі раціональної орієнтації;
- регресійний і кореляційний аналіз взаємозв'язку досліджуваних ознак.

Підсистема топологічного аналізу орієнтована на виявлення дефектів тріангуляційної 3D-моделі та їх виправлення. Такі характеристики, як суміжність ребер і суміжність вершин, дозволяють виявляти і кількісно оцінювати дефекти поверхні за кількістю граней, у яких не забезпечуються умови суміжності ребер $A_{Edge} = 2$ і суміжності вершин $A_{Vert} \geq 3$ [91]. Тому дані характеристики слід також розглядати при підготовці моделей до їх матеріалізації.

Підсистема морфометричного аналізу орієнтована на попередню оцінку конструкційних особливостей виробу на основі статистичних характеристик геометричних властивостей граней тріангуляційної 3D-моделі. У даній підсистемі передбачено аналіз за такими комплексами характеристик [91, 209]:

- вершин (координати за осями X , Y , Z ; відстань від початку координат; суміжність вершин);
- ребер (довжина ребер; суміжність ребер);
- граней (периметр; площа; радіуси описаної, вписаної кіл та їх співвідношення; напрямні косинуси векторів нормалей за осями X , Y , Z ; площин ортогональних проекцій).

Система морфологічного аналізу тріангуляційних 3D-моделей застосовувалася в дослідженнях при виявленні можливостей оцінки геометричної складності виробів (розд. 3).

2.8 Статистична обробка експериментальних даних

Обробка результатів модельних та експериментальних досліджень проводилася за допомогою методів математичної статистики з метою виявлення значень, тих що різко виділяються, середньоарифметичних значень, середньоквадратичних відхилень, квартилей та довірчих інтервалів результатів досліджень, визначення суттєвості відмінності гістограм розподілу досліджуваних ознак [210].

Рівняння регресії, що описують залежності досліджених ознак, та їх коефіцієнти отримували методом найменших квадратів. В окремих випадках кращі результати виходять при мінімізації відносних відхилень.

Планування експериментів для визначення оптимальних технічних параметрів АМ-процесу виконувалось за критерієм мінімуму кількості шарів побудови з обмеженням за якістю та точністю одержаної поверхні.

РОЗДІЛ 3

ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ВИРОБІВ ОДЕРЖУВАНИХ З ВИКОРИСТАННЯМ АДИТИВНИХ МЕТОДІВ

У цьому розділі розглянуто питання щодо виконання оцінки технологічності конструкції виробів, одержуваних з використанням АМ- методів. Пропонується набір показників складності виробу з урахуванням всіх складових поняття "складність", що відображають специфічні особливості адитивних технологій. Розширення набору показників дозволить науково обґрунтовано здійснювати вибір стратегії виготовлення виробу на етапі технологічної підготовки.

Сформульовано і доведено наукове положення щодо необхідності аналізу впливу параметрів тріангуляції на кількість граней одержуваних 3D-моделей для виконання оцінки геометричної складності виробів. Кількісне визначення відносної складності виробу дозволить науково обґрунтовано визначати рівень технологічності його виготовлення адитивними технологіями.

3.1 Особливості оцінки технологічності конструкції виробів, одержуваних адитивними методами

Інтенсивний розвиток адитивних технологій (Additive Manufacturing) та їх особливості виготовлення виробів складної геометрії створює потребу в розробці науково обґрунтованої методології оцінки технологічності виробів для раціонального вибору стратегії виготовлення на основі геометричної інформації про виріб [74].

Стосовно до адитивних технологій вихідною геометричною інформацією для виготовлення є тріангуляційна 3D-модель промислового виробу [4]. На рис. 3.1 представлена схема структури виробу з сучасних позицій роботи у CAD-системах при технологічній підготовці матеріалізації з використанням адитивних методів пошарової побудови. Данна схема демонструє різні підходи по роботі з конструкцією виробу, а також перехід від технологічного уявлення

щодо промислового виробу (складальної одиниці) до тріангуляційного опису його конструкції.

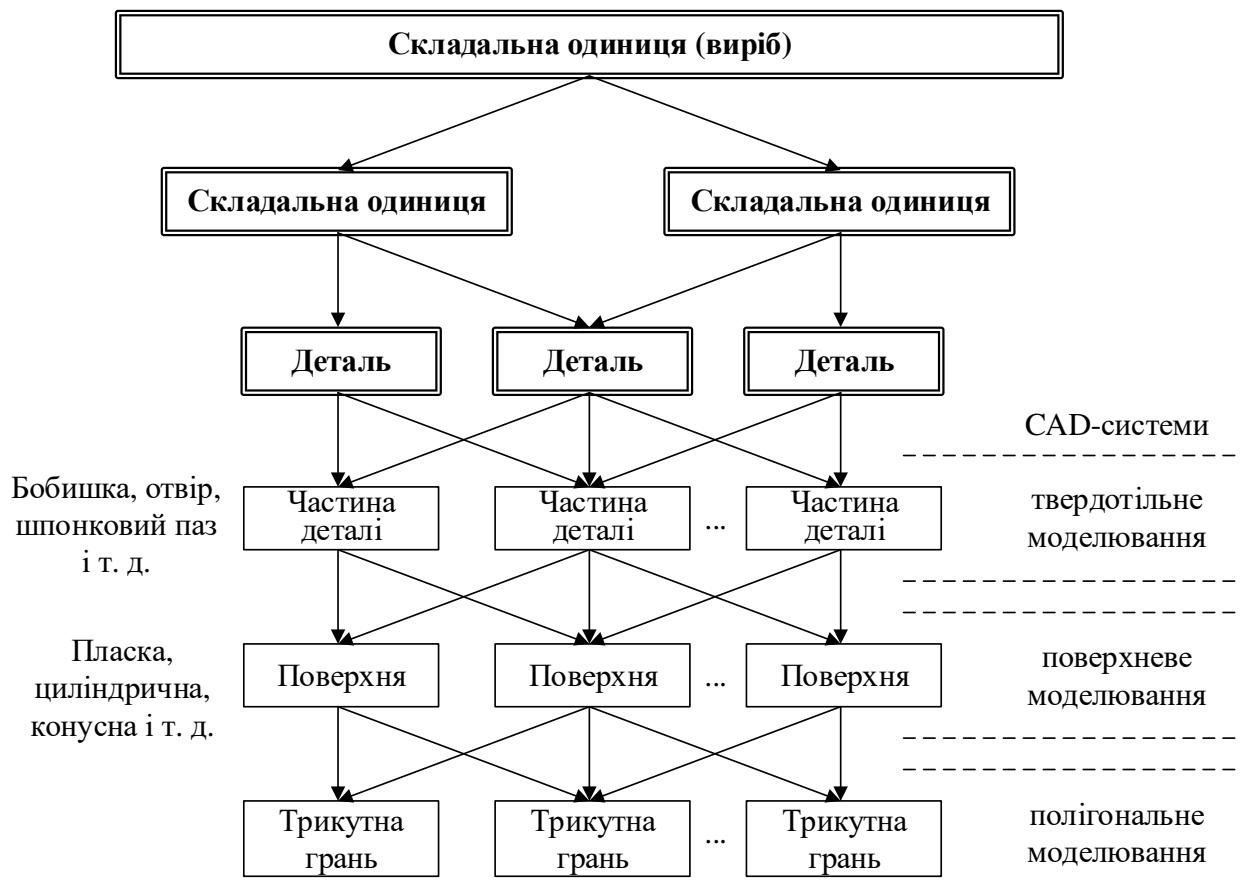


Рисунок 3.1 – Структура конструкції промислового виробу як системи трикутних граней

Тріангуляційна 3D-модель уніфікує уявлення про поверхню виробу, що створює передумови для аналізу системи трикутних граней. Аналіз 3D-моделі повинен представляти собою визначення безрозмірних показників, що дозволяють оптимізувати процес виготовлення (для заданих показників якості, об'єму випуску, умов виконання робіт та обладнання) [68, 69].

Практика показує істотну роль технологічної підготовки щодо вибору та ефективної реалізації стратегії виготовлення виробів (особливо зі складною формою поверхонь). Загальна схема розробки АМ-процесу представлена на рис. 3.2 [102]. Основними задачами технологічної підготовки виготовлення виробів з використанням адитивних методів пошарової побудови (АМ-процесами) є [109]: вибір методу виготовлення і матеріалу виробу,

відпрацювання конструкції на технологічність [211], визначення стратегії виготовлення [199, 200], структурна оборотна декомпозиція [212], раціональна орієнтація виробу на робочій платформі [213, 214], масштабування тріангуляційних моделей (технологічна компенсація усадки матеріалу) [208], створення підтримуючих структур (наприклад, для способів SLA та FDM), вибір стратегії нарізки моделі для створення набору перерізів [215], завдання параметрів формоутворення шарів [183, 216-218] та пост-обробки і т. д.

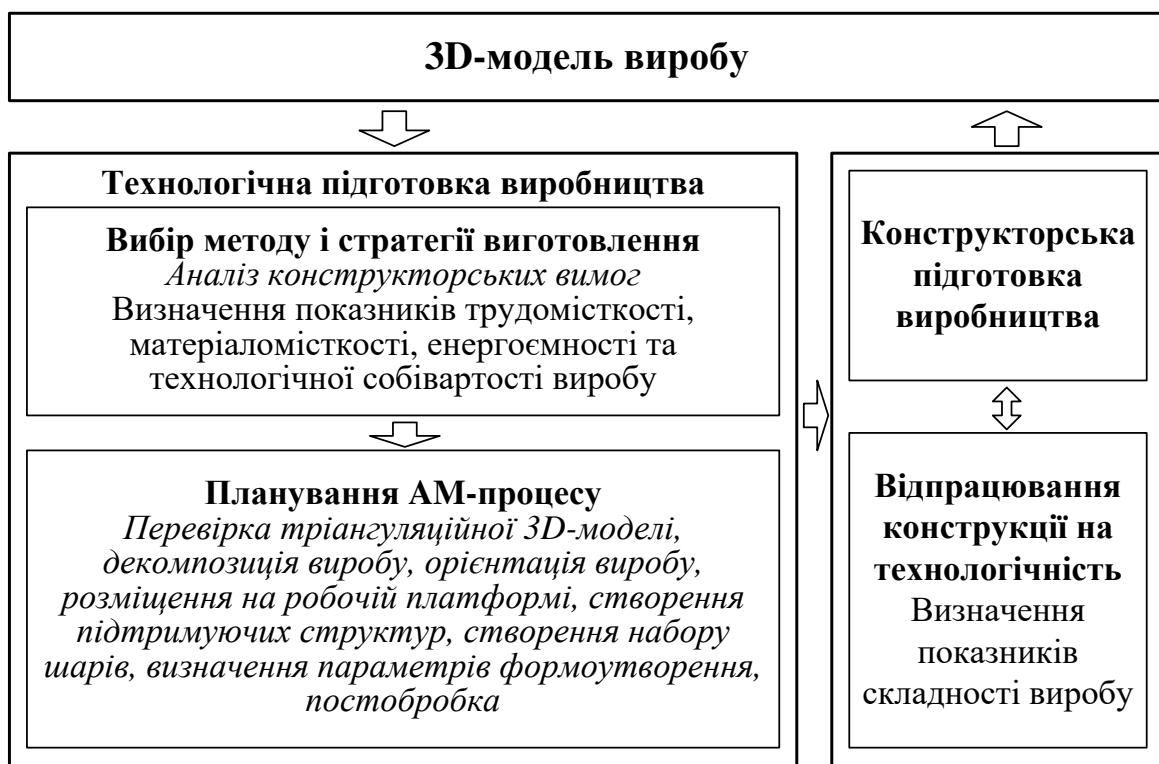


Рисунок 3.2 – Схема розробки АМ-процесу

В загалом задачі технологічної підготовки матеріалізації виробів адитивними методами є не тільки окремими, але і взаємопов'язаними. Цей взаємозв'язок проявляється в різних аспектах, які виникають від загальних обмежуючих факторів [109]. Тому слід виконувати весь комплекс задач на основі єдиних критеріїв технологічності конструкції виробу.

При використанні адитивних технологій, як і традиційних технологій, присутній пряний причинно-наслідковий зв'язок між складністю конструкції і

собівартістю виробу [219]. Тому цей зв'язок необхідно враховувати при виконанні технологічної підготовки АМ-процесів.

У відомих роботах [74, 91, 220] визначення технологічності конструкції обмежене використанням показників, що характеризують геометричну складність виробу. Це притому, що визначення поняття "складність" для виробу, одержаного адитивними технологіями, включає кілька складових [9]: геометрична складність, складність структури матеріалів, ієрархічна і функціональна складності. Тому існуючі показники не є досить представницькими для подальшого прийняття технічних рішень по підготовці АМ-процесів. Відповідно запропоновано набір показників складності конструкції виробу з урахуванням всіх складових поняття "складність", що відображають специфічні особливості адитивних технологій. Розширення набору показників дозволить науково обґрунтовано здійснювати вибір стратегії виготовлення виробу.

Технологічна підготовка, стосовно до адитивних технологій, тісно пов'язана з конструкторською підготовкою (див. рис. 3.1), яка як правило включає наступні задачі [102]:

- адаптація вимог конструкції виробу до технологічних можливостей адитивних технологій;
- відпрацювання технологічності конструкції виробу (ТКВ) з урахуванням конструкторських і технологічних обмежень;
- топологічна оптимізація конструкції.

При виконанні другої задачі визначають можливості і обмеження адитивних технологій. Наприклад: розміри і об'єм робочого простору АМ- установки, доступні матеріали для обраного методу виготовлення, механічні властивості матеріалу, мінімально допустимий розмір елемента конструкції, час і собівартість побудови і т. д.

На останній задачі реалізуються переваги адитивних технологій у створенні складних геометричних форм для вдосконалення конструкції виробу. Але слід враховувати технологічні обмеження за геометричною складністю

виробу, особливості його орієнтації, пошарового формування виробу і підтримуючих структур для «звисаючих» поверхонь.

Виконувана при відпрацюванні ТКВ оцінка технологічності, передбачає комплекс взаємопов'язаних заходів, що включають завдання з послідовним виявленням ТКВ в цілому або окремих розглянутих її властивостей і представлення результатів у формі, прийнятній для прийняття рішень щодо удосконалення конструкції виробу і технології його виготовлення [68].

Процес визначення показників ТКВ реалізується в наступній послідовності: аналіз тріангуляційної 3D-моделі з отриманням вихідних даних для аналізу; обробка результатів аналізу; вибір номенклатури показників; визначення показників. Число показників приймається мінімальним, але достатнім для об'єктивної оцінки технологічності.

Для адитивних технологій, на відміну від традиційних, є характерним несуттєвий зв'язок показників технологічності конструкції з видом виробу. При оцінці показників ТКВ слід їх розглядати відносно базових значень, в якості яких приймаються величини, характерні (нормативні) для заданого (обраного) АМ-обладнання. Становить інтерес створення бази даних обладнання адитивних технологій з досягнутими показниками технологічності для обґрунтованого визначення нормативних значень.

Досягнуті показники ТКВ для кожної стадії створення виробу використовуються для порівняльного аналізу, а також для визначення рівня ТКВ:

$$K_L = \frac{K_i}{K_{Norm}}, \quad (3.1)$$

де K_i , K_{Norm} – досягнутий і нормативний показники технологічності конструкції відповідно.

Класифікація показників, створена з урахуванням особливостей оцінки ТКВ для АМ-процесів представлена на рис. 3.3.



Рисунок 3.3 – Класифікація показників технологічності конструкції виробу

За представленою класифікацією (рис. 3.3) розглянуто показники у наступних підрозділах. Найбільшу увагу приділено питанням та оцінці складності виробів, одержуваних АМ-процесами, як найменш проробленим у наукових публікаціях.

3.2 Показники складності конструкції виробу

Основними факторами, що впливають на забезпечення технологічності при відпрацюванні конструкції виробу, є його складність і обмеження обраної технології (з урахуванням умов виробництва) [97, 220]. Тому необхідно визначення показників складності виробу для обґрутованого вибору нормативного показника ТКВ.

Конструкцію виробу характеризують в загальному випадку матеріал, склад, взаємне розташування його складових частин, структурне виконання, форма та відносне розташування поверхонь з їх шорсткістю і розмірами [68].

Адитивні технології мають величезний потенціал щодо складності створюваної конструкції, пропонуючи свободу у створенні геометричних форм поверхонь, але такий потенціал не є необмеженим. Обмеження виникають у наслідок технологічного принципу пошарової побудови, використаного матеріалу виробу та АМ-обладнання [75].

Поняття "складність" стосовно виробів, одержуваних адитивними технологіями, включає складові [9], які слід оцінювати окремими показниками:

K_G – геометрична складність, яка характеризується топологічною складністю [102], поверхнями складної форми, криволінійними обмежуючими контурами, різноманітністю взаємного розташування поверхонь та їх розмірів;

K_S – складність структури матеріалів, яка характеризується просторовим розташуванням складових матеріалу у якості частинок або шарів;

K_H – ієрархічна складність, яка характеризується використанням ієрархічних багатовимірних структур (з елементами, під要素ами і т. д.);

K_F – функціональна складність, яка характеризується безпосереднім виготовленням функціональних кінематичних пристройів в зібраному вигляді.

Показник геометричної складності K_G безпосередньо визначає трудомісткість виробу на етапах технічної підготовки виробництва і виготовлення. Цей показник пропонується визначати на основі аналізу впливу параметрів тріангуляції CAD-моделі (максимально допустимих значень похибки Δ_{max} , розміру ребра l_{max} або двогранного кута між суміжними гранями ϕ_{max}) на кількість граней тріангуляційної 3D-моделі виробу N_{Face} (вивчення питання представлено в наступному розділі).

3.3 Оцінка геометричної складності промислових виробів на основі аналізу їх тріангуляційних 3D-моделей

Використання безрозмірних показників, що характеризують геометричну складність промислового виробу, може дозволити вирішувати цілий ряд виробничих завдань, що виникають на основних етапах його життєвого циклу, зокрема, на етапах технологічної і організаційно-економічної підготовки

виробництва. Тому науково обґрунтована оцінка геометричної складності виробів на базі їх тріангуляційних 3D-моделей є актуальним завданням.

У відомих роботах оцінка геометричної складності виробів, що готуються до матеріалізації адитивними технологіями, проводилася на основі показників, які визначаються шляхом топологічного та морфометричного аналізу тріангуляційних моделей [91, 198]. Показники не враховували особливості завдання параметрів тріангуляції 3D-моделей. Їх значення задають обмеження CAD-системі при вирішенні оптимізаційної задачі переходу до тріангуляційної 3D-моделі. Параметри тріангуляції з урахуванням конструкції виробу визначають кількість і геометричні (статистичні) характеристики трикутних граней. Тому існуючі показники не є достатньо представницькими для подальшого прийняття технологічних рішень на етапі підготовки АМ-процесів.

Запропонована наукова гіпотеза про те, що аналіз впливу параметрів тріангуляції (в першу чергу — допустимої похибки) на кількість трикутних граней, що замінюють поверхню в CAD-системі, може дозволити оцінювати геометричну складність виробів, а отже — технологічність їх виготовлення адитивними методами пошарової побудови.

3.3.1 Дослідження залежності кількості граней 3D-моделі від допустимої похибки тріангуляції

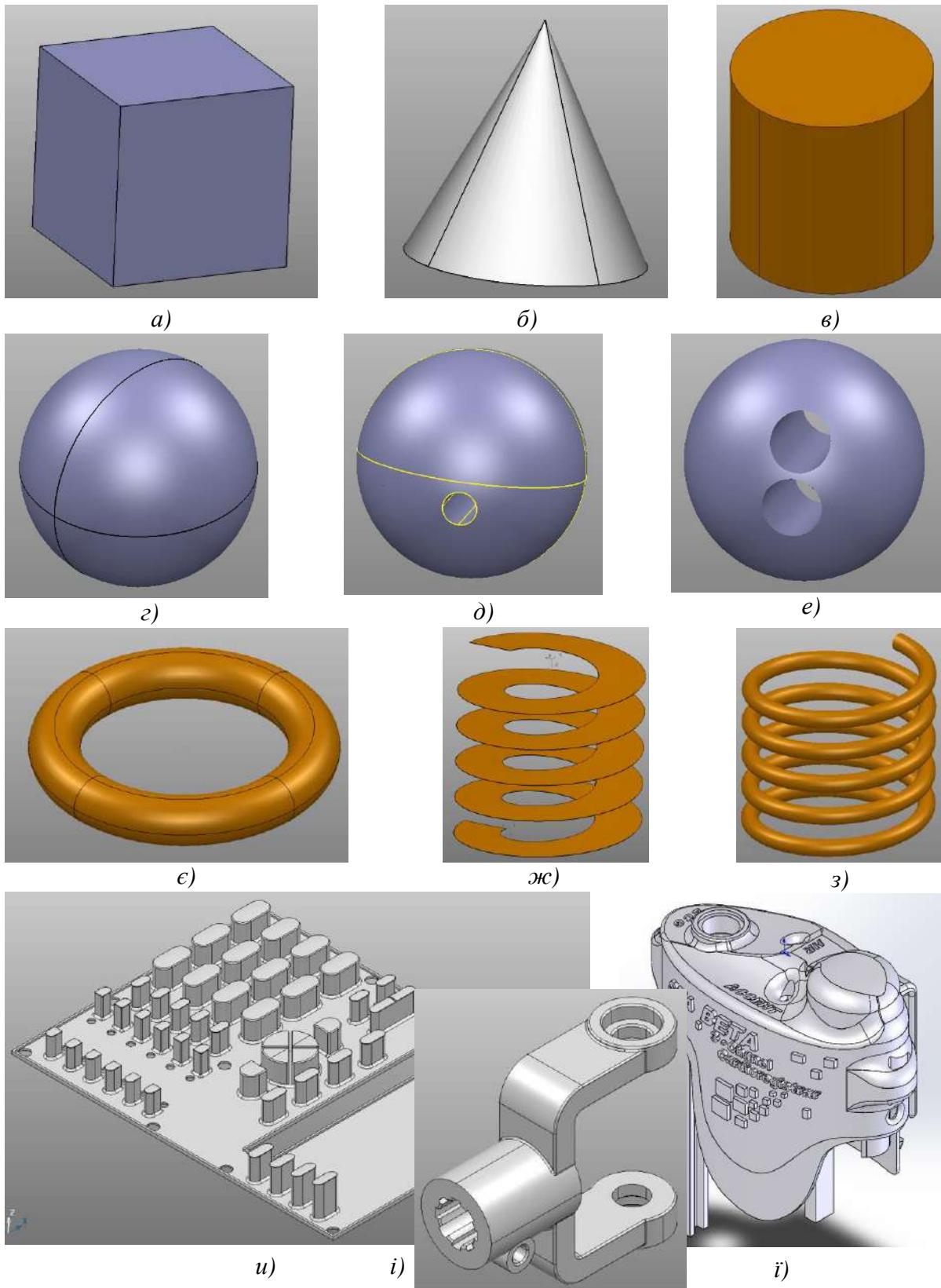
У дослідженні використовувалася CAD-система PowerShape (виробник Autodesk), що пропонує досить гнучкі налаштування параметрів тріангуляції. В системі PowerShape передбачено завдання двох параметрів, що визначають процес тріангуляції поверхонь 3D-моделі: допустима похибка Δ_{max} і максимально допустимий розмір ребра l_{max} . Основним параметром є Δ_{max} , що визначає кількість трикутних граней з урахуванням складності геометрії поверхні (виду поверхні і обмежуючих її контурів). Додатковий параметр l_{max} задає обмеження на максимальний розмір ребер трикутних граней, що в ряді випадків (особливо для плоских поверхонь) збільшує їх кількість при

тріангуляції моделі виробу. У відомих CAD-системах основним параметром тріангуляції вважається Δ_{max} . Наприклад, в CAD-системі Solidworks додатково пропонується максимально допустимий двогранний кут між суміжними гранями. Тому параметр Δ_{max} загальноприйнятий в CAD-системах як основний, представляє особливий інтерес для аналізу функціональної залежності кількості трикутних граней N_{face} від параметрів тріангуляції на прикладі простих геометричних тіл і декількох тестових моделей промислових виробів, представлених на рис. 3.4.

Функціонально-регресійний аналіз залежності $N_{face} = f(\Delta_{max})$ виконувався в професійному статистичному пакеті Statistica (StatSoft, Inc.) та програмі MS Excel. Аналіз $N_{face} = f(\Delta_{max})$ для набору простих геометричних тіл (рис. 3.4) дозволить виявити показники для оцінки геометричної складності виробу за його 3D-моделью.

Оскільки абсолютна кількість трикутних граней для досліджених моделей суттєво відрізняються, то для забезпечення порівняльного аналізу результатів та їх спільної оцінки виконувалася нормування досліджуваних ознак N_{face} і Δ_{max} . При нормуванні абсолютно значення досліджуваних ознак функціонально перетворюються до відносних. Як правило, їх приводять до єдиного досліджуваного діапазону значень 0÷1. Основними вимогами до нормування є її відносна простота і адекватність [204, 205].

Перехід від абсолютнох значень досліджених ознак N_{face} , Δ_{max} до відносних (безрозмірних) виконувався порівнянням з еталонним значенням [204]. Для цього введено поняття — «базова модель», в якості якої приймається найбільш точна (з мінімально допустимою похибкою Δ_{max}) з досліджуваного ряду тріангуляційних 3D-моделей. В результаті дослідженні ознаки тріангуляційних 3D-моделей, отриманих на основі тріангуляції однієї CAD-моделі і відповідно, мають модельну подобу, розглядаються відносно значень відповідних ознак базової моделі. У даному випадку це кількість граней N_{face} і похибка тріангуляції Δ_{max} . Тому регресійний аналіз виконувався для нормованих значень:



a - куб з пласкими поверхнями); *б* - конус з поверхнями пласкою і торцевої прямого кругового конуса, *в* - циліндр з торцевими поверхнями пласкими і циліндричною поверхнею обертання, *г-е* - сфери (поверхня сферична, сферична і однієї циліндричної із загальними криволінійними контурами, сферична і двома циліндричними із загальними криволінійними контурами), *є* - відкритий тор, *ж* - прямий гелікоїд, *з* - винтова поверхня циліндричної пружини, *и* - *ї* - тестові моделі промислових виробів (№ 1 - панель (*и*), № 2 - карданний вал (*ї*), №3 - кришка (*ї*))

Рисунок 3.4 – 3D-моделі для аналізу функціональних залежностей досліджуваних ознак

$$x_{\Delta} = \Delta_{max0}/\Delta_{max}, \quad y_N = N_{face}/N_{face0}, \quad (3.2)$$

де Δ_{max0} , N_{face0} – досліджувані ознаки базової моделі (еталонні значення).

Запропоноване нормування (3.2) дозволяє перейти до діапазону значень $x_{\Delta} \in (0,1]$ і $y_N \in (0,1]$ для всього ряду тріангуляційних 3D-моделей, отриманих на основі однієї досліджені CAD-моделі незалежно від її геометричних властивостей.

При аналізі залежності $y_N = f(x_{\Delta})$ тріангуляційні 3D-моделі створювалися по CAD-моделі з допустимою похибкою тріангуляції $\Delta_{max} = 10^{-3} \div 10^{-1}$ мм. Діапазон значень Δ_{max} визначався вимогами необхідної точності тріангуляційної 3D-моделі для виготовлення виробу існуючими адитивними технологіями і досить великого інтервалу, що дозволяє виявити особливості функціональної залежності $y_N = f(x_{\Delta})$ для тестових моделей.

Вивчення залежності $y_N = f(x_{\Delta})$ для тестових моделей (див. рис. 3.4) виконувалося при об'ємі вибірки $n = 5$ (кількість тріангуляційних 3D-моделей, створених на базі тестової CAD-моделі). Критичне значення коефіцієнта кореляції становило $R_{cr} = 0,991$ для числа ступенів свободи $d_f = (r - 2) = 3$ при рівні значущості $\alpha = 0,001$ [221].

За результатами регресійного аналізу залежності $y_N = f(x_{\Delta})$ з використанням набору рівнянь з [221] та їх комбінацій, наступне рівняння регресії забезпечує найменші значення максимального відносного відхилення від модельних даних:

$$y_N = ax_{\Delta} + b\sqrt{x_{\Delta}} + c, \quad (3.3)$$

Результати регресійного аналізу за рівнянням (3.3), представлені в табл. 3.1.

Виявлені залежності відносної кількості граней від допустимої відносної похибки тріангуляції досліджуваних 3D-моделей представлені на рис. 3.5. Функціональні залежності для куба і циліндра істотно відрізняються від інших 3D-моделей. Відносна відмінність інших 3D-моделей несуттєва і в ряді

Таблиця 3.1 – Результати регресійного аналізу залежності відносної кількості граней 3D-моделі від відносної величини допустимої похибки тріангуляції

Модель (розміри, мм)	Кількість граней базової моделі ($\Delta_{max0} = 1 \text{ мкм}$)	Коефіцієнти рівняння (3.3)		
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Куб (100×100)	12	-	-	1,00
Конус ($R = 50, H = 100$)	994	-0,008	1,008	0
Циліндр ($R = 50, H = 100$)	1 988	-0,008	1,008	0
Сфера ($R = 50$)	517 548	1,001	-0,002	0,001
Сфера ($R = 100$)	1 030 840	0,993	0,007	0
Сфера з отв. ($R = 100, r = 15$)	507 080	0,982	0,018	0
Сфера з отв. ($R = 100, r = 25$)	1 021 106	0,985	0,015	0
Сфера з 2-ма отв. ($R = 100, r = 25$)	1 007 294	0,975	0,025	0
Top ($R = 50, r = 5$)	261 172	0,977	0,023	0
Top ($R = 50, r = 10$)	378 804	0,975	0,026	0,001
Гелікоїд ($R = 50, H = 100$)	53 600	0,880	0,119	0
Пружина ($R = 50, r = 5, H = 100$)	1 319 840	0,978	0,022	0
Тестова модель виріб №1 ($151,5 \times 195,5 \times 20,1$)	499 952	0,676	0,317	0,007
Тестова модель виріб №2 ($147,5 \times 50,0 \times 124,0$)	175 154	0,813	0,186	0,001
Тестова модель виріб №3 ($83,9 \times 101,3 \times 43,2$)	387 264	0,728	0,269	0,003

випадків знаходиться в межах похибки визначення значень їх коефіцієнтів.

Коефіцієнти рівнянь регресії для 3D-моделей сфер з різними радіусами мають досить близькі значення (відносне відхилення $< 1\%$), що додатково підтверджує раціональність вибору рівняння регресії і нормування досліджуваних ознак.

Аналіз кількості трикутних граней для окремих поверхонь моделі сфери з отвором (результати представлені в табл. 3.2) показав, що коефіцієнти рівнянь приблизно відповідають середньоарифметичному відносних кількостей граней сферичної N_{mean_sph} і циліндричної поверхні N_{mean_cil} . коефіцієнт a – для поверхні сфери ($N_{mean_sph} = 0,976$, при значенні коефіцієнта $a = 0,979$) і b — для циліндричної поверхні отвору ($N_{mean_cil} = 0,024$ при $b = 0,021$).

Результати аналізу тестових моделей (на прикладі моделі сфери з отвором представлені в табл. 3.2) дозволяють стверджувати, що значення коефіцієнтів рівняння регресії (3.3) можна асоціювати з відносною кількістю трикутних граней, що належить окремим видам поверхонь: a - сферична; b - циліндрична та плоска з криволінійним контуром; c - плоска з прямолінійним контуром (кількість граней не змінюється від допустимої похибки тріангуляції Δ_{max}). Таким чином, на основі порівняння значень коефіцієнтів можливою є оцінка геометричної складності виробів.

Деякі коефіцієнти рівнянь регресії в табл. 3.1 несуттєво виходять за допустимі межі $0 \div 1$. Це пов'язано з особливістю їх визначення в пакеті Statistica. Застосоване нормування досліджуваних ознак (3.2) передбачає виконання для коефіцієнтів рівняння (3.3) наступної умови:

$$a + b + c = 1. \quad (3.4)$$

Тому для забезпечення коректної оцінки геометричної складності виробів значення коефіцієнтів рівняння (3.3), що виходять за допустимі межі діапазону, $a \in [0,1], b \in [0,1], c \in [0,1]$ слід з урахуванням умови (3.4) округляти до найближчого граничного значення.

Для підтвердження результатів регресійного аналізу та висновку щодо

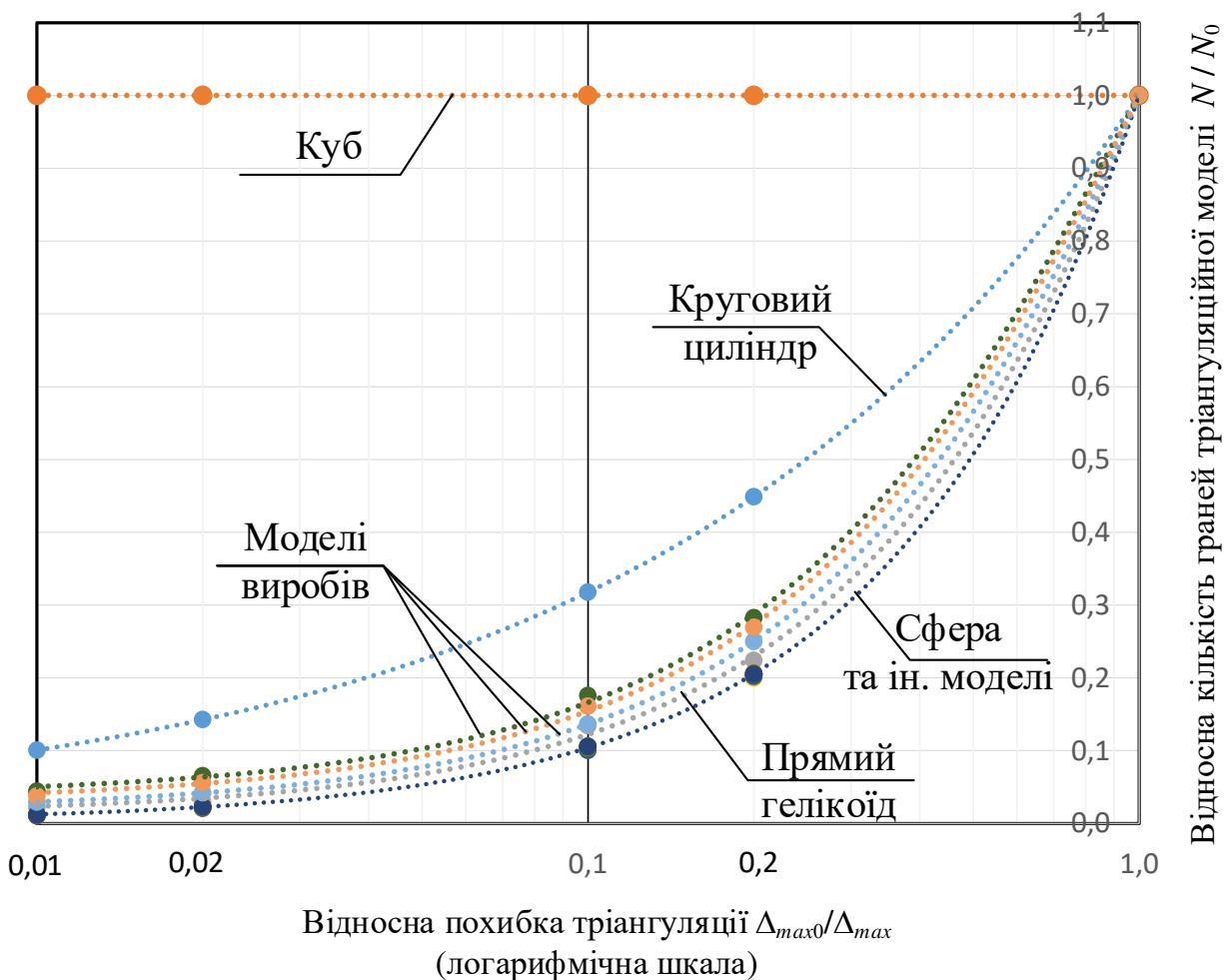


Рисунок 3.5 – Вплив відносної похибки тріангуляції на відносну кількість граней тріангуляційної 3D-моделі (похибка базової моделі $\Delta_{max0} = 0,001$ мм, кількість граней базової моделі N_0 приведено в табл. 3.1)

Таблиця 3.2 - Результати аналізу відносної кількості граней для окремих поверхонь тріангуляційних 3D-моделей сфери з отвором

Відносна похибка тріангуляції моделі $\Delta_{max0} / \Delta_{max}$	Відносна кількість трикутних граней для поверхні	
	сферичної	циліндричної (отвір)
1,00	0,995	0,005
0,20	0,987	0,013
0,10	0,982	0,018
0,02	0,960	0,040
0,01	0,954	0,046

зв'язку коефіцієнтів рівняння (3.3) з кількістю трикутних граней, що належать певним видам поверхонь, розглянуто особливості тріангуляції плоскої, циліндричної та сферичної поверхні.

Плоскі поверхні. Приклади тріангуляції плоских поверхонь представлено на рис. 3.6. З позицій тріангуляції необхідно плоскі поверхні розділити на групи за формою обмежуючих контурів — прямолінійною (рис. 3.6 а, б), криволінійною (рис. 3.6 в, г) та комбінованою (рис. 3.6 д, е).

Плоскі поверхні з прямолінійними контурами. Для таких поверхонь кількість граней визначається особливостями тріангуляції в CAD-системі і не залежить від Δ_{max} (рис. 3.6а, б):

$$N_{face_fl} = const.$$

Приклади, представлені на рис. 3.6 а, б, відрізняються включенням додаткового параметра тріангуляції - максимально допустимий розмір ребер l_{max} .

Для плоских поверхонь з криволінійним контуром кількість граней N_{face} буде змінюватися в залежності від периметра і радіуса кривизни контуру. Наприклад, для поверхні обмеженою колом, трикутні грані будуть утворювати вписаний багатокутник. За умови досить великого співвідношення радіусу кола R_{circle} до величини похибки Δ_{max} можна визначити кількість граней N_{face} зі співвідношення довжини кола контуру до розміру зовнішніх ребер l_{out} , визначених R_{circle} і Δ_{max} [202]:

$$N_{face_fc}(\Delta_{max}) = \frac{2\pi R_{circle}}{l_{out}} = \frac{2\pi R_{circle}}{2\sqrt{R_{circle}^2 - (R_{circle} - \Delta_{max})^2}} = \frac{\pi R_{circle}}{\sqrt{2R_{circle} \cdot \Delta_{max} - \Delta_{max}^2}},$$

Δ_{max}^2 можна відкинути т. к. $\Delta_{max}^2 \ll R_{circle} \cdot \Delta_{max}$ в результаті отримаємо:

$$N_{face_fc}(\Delta_{max}) \approx \frac{\pi R_{circle}}{\sqrt{2R_{circle} \cdot \Delta_{max}}} \approx \frac{\pi}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{R_{circle}}{\Delta_{max}}}. \quad (3.5)$$

Отримана залежність (3.5) застосована для двох варіантів тріангуляції, представлених на рис. 3.6 в, г.

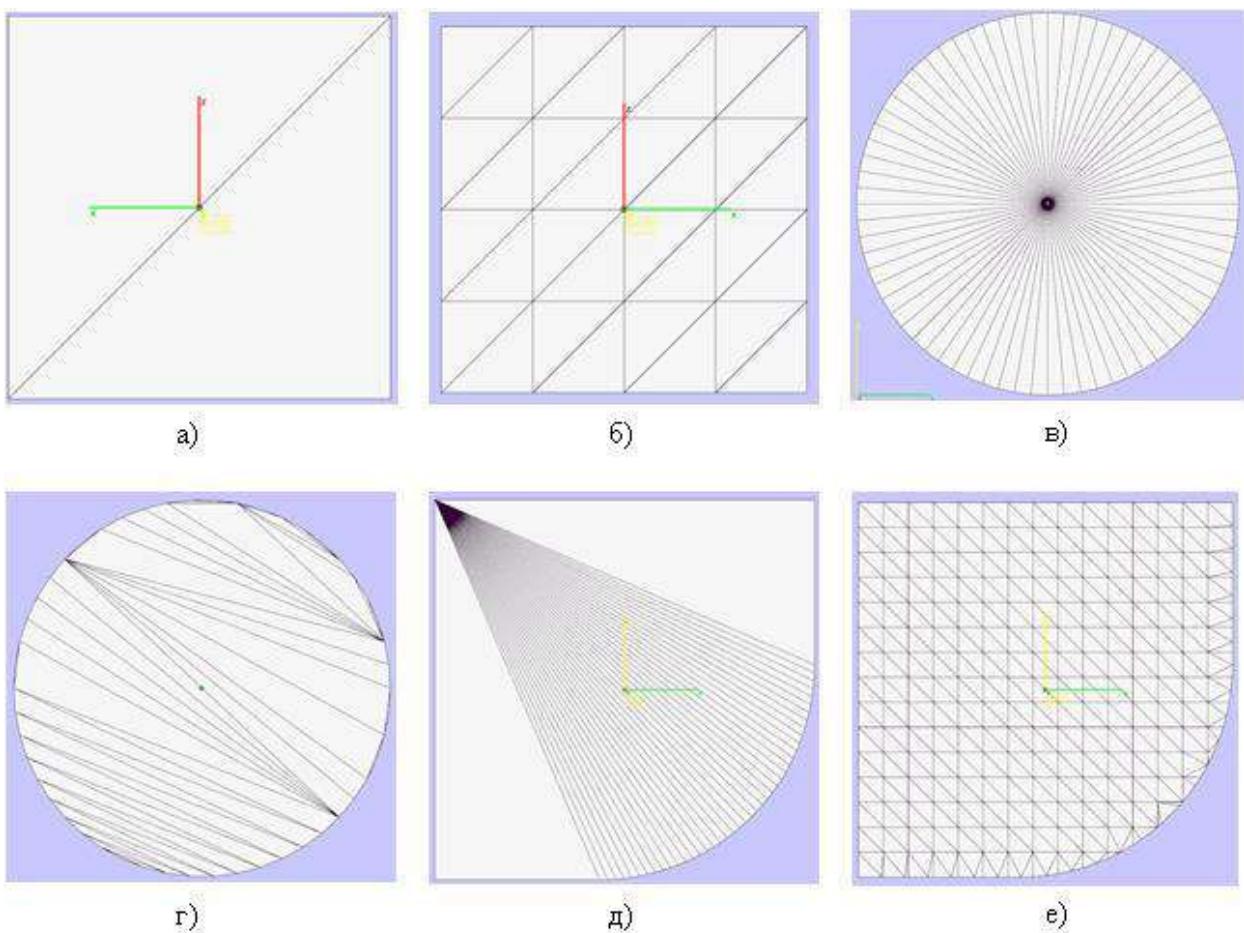


Рисунок 3.6 - Тріангуляційні пласкі поверхні з прямолінійними контурами (а, б), з криволінійним контуром по колу (в, г) і комбіновані (д, е)

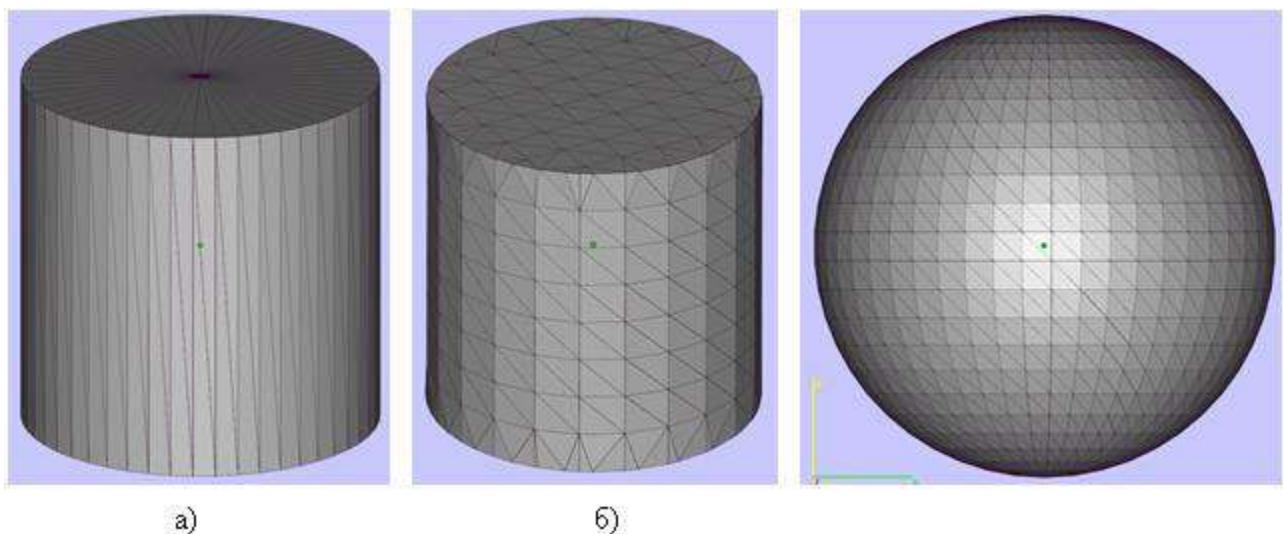


Рисунок 3.7 – Тріангуляція прямих кругових циліндрів з завданням припустимої похибки тріангуляції Δ_{max} (а) і максимального допустимого розміру ребра l_{max} (б)

Рисунок 3.8 – Тріангуляція сфери

Плоскі поверхні з комбінованим контуром (рис. 3.6 д, е) поєднують особливості визначення кількості граней для двох груп з прямолінійним і криволінійним контуром:

$$N_{face_lc}(\Delta_{max}) = N_{face_l} + N_{face_c}. \quad (3.6)$$

де N_{face_l} – кількість граней, що описують прямолінійні ділянки контуру;

N_{face_c} – кількість граней, що описують криволінійні ділянки контуру.

На прямолінійних ділянках контуру кількість граней N_{face_l} не залежить від величини Δ_{max} , але визначається кількістю таких ділянок (за умови відсутності обмежень на розмір ребер). На криволінійних ділянках залежить від їх периметра P_{curve} і радіуса кривизни R_{curve} за аналогією з (3.5) (для прикладу, представленого на рис. 3.6 д і умови $R_{curve} = const$):

$$\begin{aligned} N_{face_c}(\Delta_{max}) &= \frac{P_{curve}}{l_{out}} = \frac{\varphi R_{curve}}{2\sqrt{R_{curve}^2 - (R_{circle} - \Delta_{max})^2}} = \\ &= \frac{\varphi R_{curve}}{2\sqrt{2R_{curve} \cdot \Delta_{max} - \Delta_{max}^2}} \approx \frac{\varphi}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{R_{curve}}{\Delta_{max}}} \end{aligned}, \quad (3.7)$$

де φ – кут дуги криволінійного контуру, рад.

Циліндричні поверхні. Розглянуто найбільш поширену в машинобудуванні бокову поверхню прямого кругового циліндра. На рис. 3.7 представлено приклади його тріангуляції. Приблизна кількість трикутних граней при описі бічної поверхні кругових циліндрів (для варіанту тріангуляції - рис. 3.7 а) буде визначатися аналогічно (3.5) за такою залежністю:

$$N_{face_cyl}(\Delta_{max}) \approx \sqrt{2}\pi \sqrt{\frac{R_{cylinder}}{\Delta_{max}}}, \quad (3.8)$$

де $R_{cylinder}$ – радіус циліндричної поверхні.

Сферичні поверхні (приклад тріангуляції представлено на рис. 3.8). Особливість тріангуляції сфер в CAD-системах — це опис ребрами граней ліній "паралелей" і "меридіанів" з двома полюсами. Тому приблизну кількість трикутників для опису сферичної поверхні цілком можна визначити як добуток

кількості трикутників, одержаних по меридіані і найбільшій паралелі. Кількість трикутників за меридіанною N_{mer} і паралеллю N_{par} буде однаковою і може визначатися як співвідношення їх периметра до довжини ребра грані l_{par} (до довжини катета прямокутного трикутника тому, що аналіз моделей показав приблизну відповідність граней прямокутного трикутника з рівними катетами). Найбільше ребро межі (гіпотенуза прямокутного трикутника) l_{par_hyp} визначається через діаметр кульового сегмента з висотою Δ_{max} . Залежність для визначення кількості граней сфери:

$$N_{face_sph}(\Delta_{max}) = N_{mer}N_{par} = N_{par}^2 = \left(\frac{2\pi R_{sphere}}{l_{par}} \right)^2 = \left(\frac{2\pi R_{sphere}}{l_{par_hyp}/\sqrt{2}} \right)^2 = \\ = 8 \left(\frac{\pi R_{sphere}}{2\sqrt{R_{sphere}^2 - (R_{sphere} - \Delta_{max})^2}} \right)^2 = \frac{\pi^2 R_{sphere}^2}{R_{sphere} \cdot \Delta_{max} - \Delta_{max}^2},$$

Δ_{max}^2 можна відкинути тому що $\Delta_{max}^2 \ll R_{circle} \cdot \Delta_{max}$ в результаті отримаємо:

$$N_{face_sph}(\Delta_{max}) \approx \frac{\pi^2 R_{sphere}^2}{R_{sphere} \cdot \Delta_{max}} \approx \pi^2 \frac{R_{sphere}}{\Delta_{max}}, \quad (3.9)$$

де R_{sphere} – радіус сфери.

Отримані залежності (3.5) – (3.9) для тріангуляції окремих випадків поверхонь не суперечать модельним даним за виявленими закономірностями впливу похибки тріангуляції на кількість трикутних граней і в достатній мірі підтверджують адекватність обраного рівняння регресії (3.3).

Для виявлення комплексного показника геометричної складності виробів далі розглядається вплив додаткових параметрів тріангуляції на кількість та геометричні характеристики граней тріангуляційних моделей різних видів поверхонь [222], застосованих у машинобудуванні.

3.3.2 Дослідження залежності кількості граней 3D-моделі від максимально допустимого розміру ребра

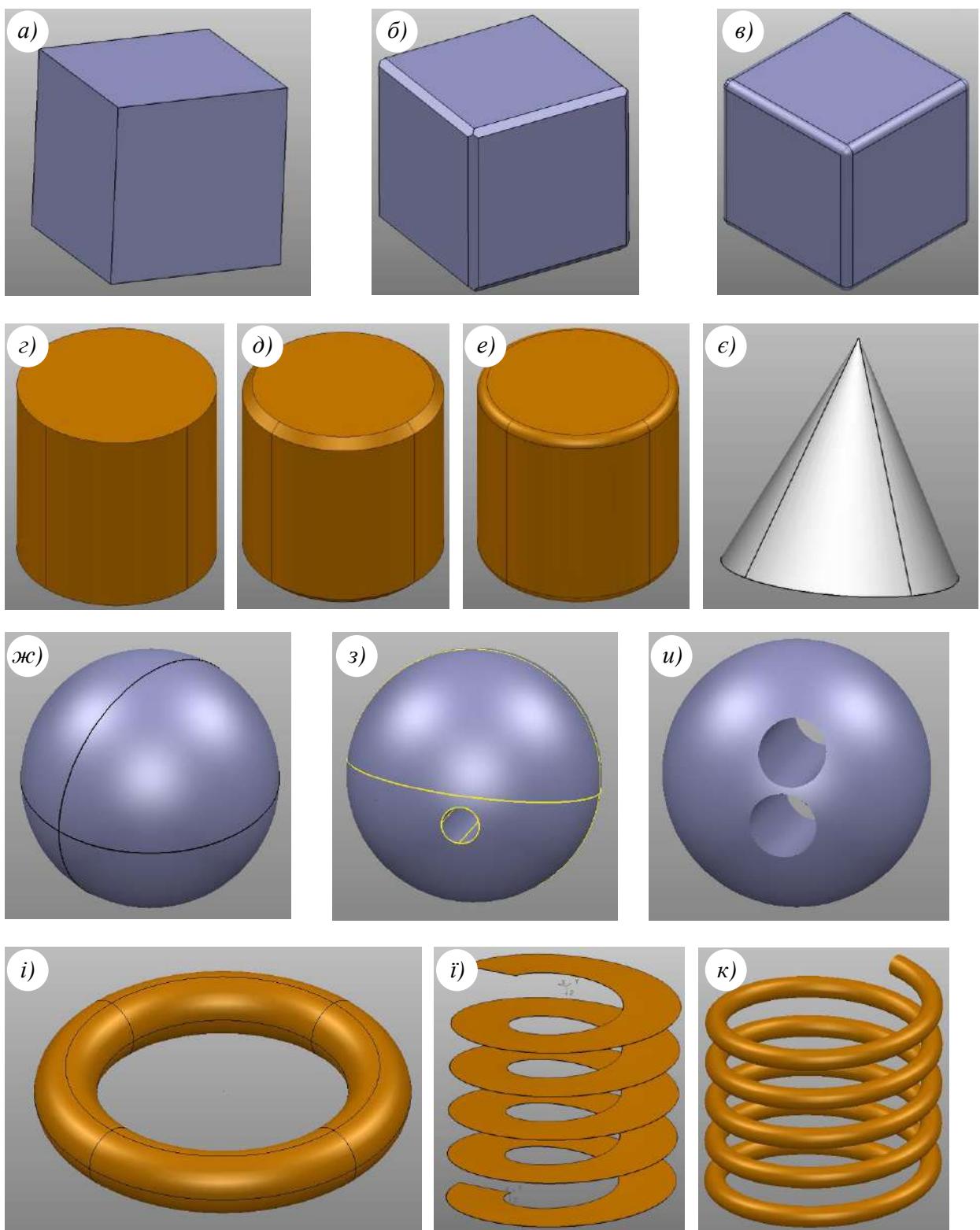
В системі PowerShape передбачено завдання двох параметрів, що

визначають процес тріангуляції поверхонь 3D-моделі: допустима похибка Δ_{max} і максимально допустимий розмір ребра l_{max} . Основним параметром є Δ_{max} , що визначає з урахуванням складності геометрії поверхні (виду поверхні і контурів, що її обмежують) кількість трикутних граней. Додатковий параметр l_{max} задає обмеження на максимальний розмір ребер трикутних граней, що в ряді випадків (особливо для пласких поверхонь) збільшує їх кількість при тріангуляції 3D-моделі виробу. Відмітна особливість l_{max} у додатковому збільшенні кількості граней за рахунок "крайового" ефекту на ділянках поверхонь, близьких до криволінійних контурів. Налаштування в Autodesk PowerShape дозволяють задати Δ_{max} досить великим, в результаті основним параметром, що задає обмеження при тріангуляції, стане параметр l_{max} . Особливість параметра l_{max} у вираженому «крайовому» ефекті представляє особливий інтерес для аналізу функціональної залежності кількості трикутних граней N_{face} від параметрів тріангуляції.

Функціонально-регресійний аналіз залежності $N_{face} = f(l_{max})$ виконувався в професійному статистичному пакеті Statistica (StatSoft, Inc.) і програмі MS Excel. Аналіз $N_{face} = f(l_{max})$ для набору простих геометричних тіл (представлені на рис. 3.9) і декількох тестових моделей промислових виробів (представлені на рис. 3.10) дозволить виявити показники для оцінки геометричної складності 3D-моделі. У порівнянні з залежністю $N_{face} = f(\Delta_{max})$, розглянутої в розд. 3.3.1, набір 3D-моделей узято більш великий з метою виявлення особливостей впливу додаткового параметра тріангуляції l_{max} .

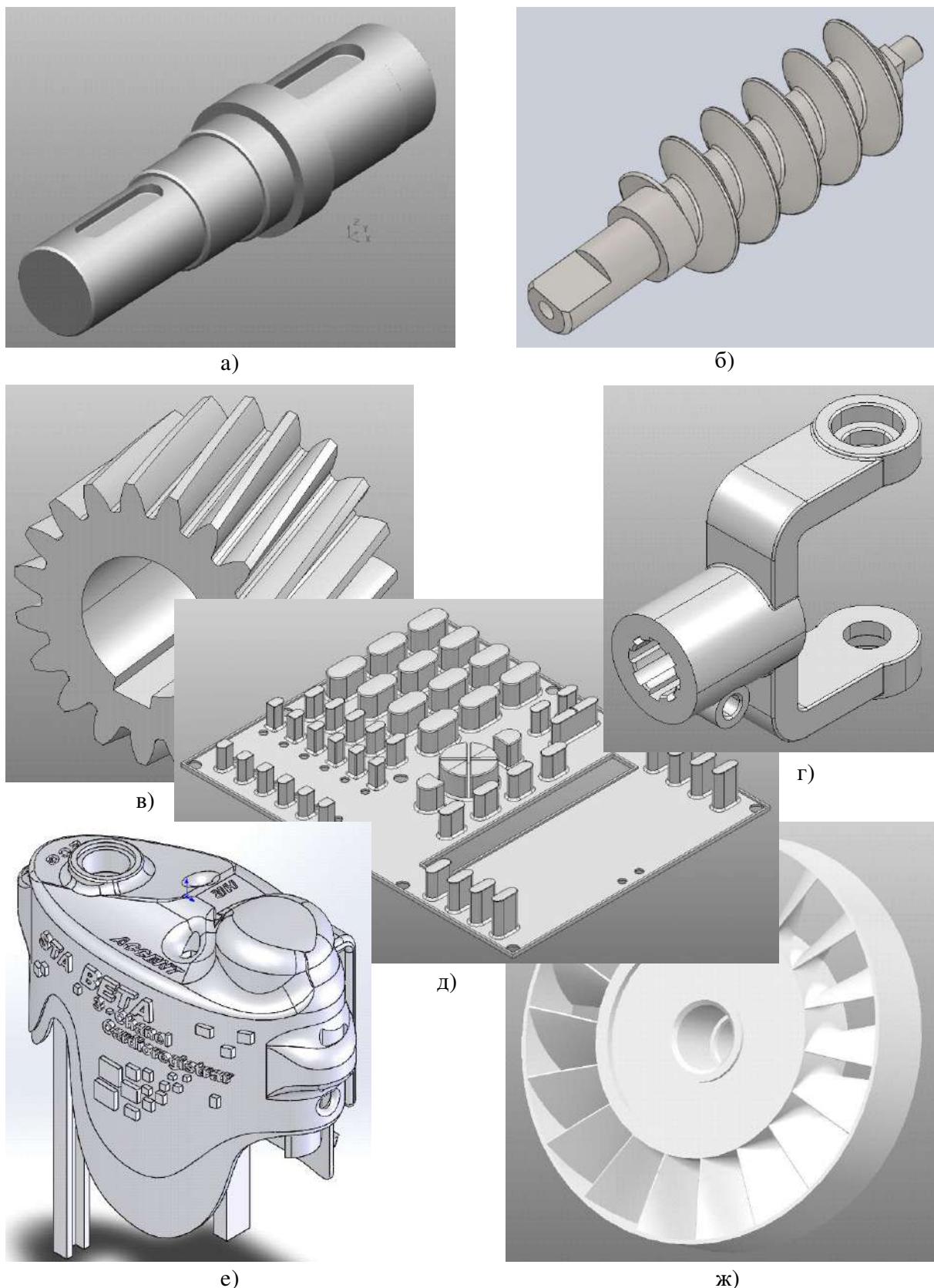
Перехід від абсолютнох значень досліджених ознак N_{face} , l_{max} до відносних, виконувався порівнянням з еталонним значенням [204]. Аналогічно переходу (3.2) в якості базової моделі приймається найбільш точна (в даному випадку з найменшою величиною l_{max}) з досліджуваного ряду тріангуляційних 3D-моделей. Відповідно, регресійний аналіз виконувався для нормованих значень:

$$x_l = l_{max0}/l_{max}, \quad y_N = N_{face}/N_{face0}, \quad (3.10)$$



а) куб (пласкі поверхні); б) куб з фасками (пласкі поверхні); в) куб з округленнями (пласкі і циліндричні поверхні); г) циліндр (торцеві пласкі поверхні і циліндрична поверхня обертання); д) циліндр з фасками (додатково конічна поверхню); е) циліндр з округленнями (додатково поверхні кругового тора); є) конус (поверхні торцева пласка і прямого кругового конуса; ж - и) сфери (поверхні сферична, сферична і однієї циліндричної із загальними криволінійними контурами, сферична і двома циліндричними із загальними криволінійними контурами); і) відкритий тор; і) прямий гелікоїд; к) гвинтова поверхня циліндричної пружини

Рисунок 3.9 – 3D-моделі для аналізу залежностей досліджуваних ознак



a) вал зі шпонковими пазами; *б)* шнек;
в) шестерня; *г)* карданний вал; *д)* панель; *е)* кришка; *ж)* вентилятор

Рисунок 3.10 – 3D-моделі промислових виробів для аналізу функціональних залежностей досліджуваних ознак

де l_{max0} , N_{face0} — досліджувані ознаки базової моделі (еталонні значення).

Запропоноване нормування (3.10) дозволяє перейти до діапазону значень $x_\Delta \in (0,1]$ і $y_N \in (0,1]$ для всього ряду тріангуляційних моделей, отриманих на основі вихідної CAD-моделі.

При аналізі залежності $y_N = f(x_l)$ тріангуляційні моделі створювалися за CAD-моделлю з максимально допустимим розміром ребра $l_{max} = 0.2 \div 4$ мм. Такий діапазон значень l_{max} визначився вимогами необхідної точності тріангуляційної 3D-моделі для виготовлення виробу, існуючими адитивними методами пошарової побудови, і досить великого інтервалу, що дозволяє виявити особливості функціональної залежності $y_N = f(x_l)$ для тестових 3D-моделей.

Вивчення залежності $y_N = f(x_l)$ для тестових 3D-моделей (див. рис. 3.9, 3.10) виконувалося при об'ємі вибірки $n = 5$ (кількість тріангуляційних 3D-моделей, створюваних на базі тестової CAD-моделі).

За результатами регресійного аналізу залежності $y_N = f(x_l)$ з використанням набору рівнянь, взятих з робіт [221] і їх комбінацій, наступне рівняння регресії з одним коефіцієнтом забезпечує найменші значення максимального відносного відхилення від модельних даних:

$$y_N = x_l^a, \quad (3.11)$$

де a — коефіцієнт рівняння регресії.

Результати регресійного аналізу з рівнянням (3.11) представлено в табл. 3.3. На рис. 3.11 показано графіки залежностей для досліджених 3D-моделей. Для базових поверхонь істотних відмінностей не спостерігається, але є тенденція до зменшення показника ступеня a (коефіцієнт рівняння (3.11)) зі збільшенням периметра контурів. Моделі з комбінацією базових поверхонь мають порівняно менші величини a . Збільшення числа складових поверхонь в досліджуваній моделі призводить до зменшення a .

При істотно малих розмірах ребер трикутних граней щодо розмірів

Таблиця 3.3 — Результати регресійного аналізу залежності кількості граней тріангуляційної моделі N_{face} від максимально допустимого розміру ребер l_{max}

Модель (розміри, мм)	Базова модель		Коефіцієнт a рівняння (3.11)
	l_{max0} , мм	N_{face0}	
Куб ($L = 100$)	0,2	6 033 072	1,993
Куб ($L = 100$)	0,4	1 512 744	1,984
Куб ($L = 100$)	0,8	380 424	1,952
Куб з фасками ($L = 100, c = 5$)	0,2	5 735 068	1,982
Куб з фасками ($L = 100, c = 5$)	0,4	1 443 205	1,971
Куб з фасками ($L = 100, c = 5$)	0,8	366 809	1,927
Куб з округленнями ($L = 100, r = 5$)	0,2	5 795 580	1,976
Куб з округленнями ($L = 100, r = 5$)	0,4	1 461 301	1,945
Куб з округленнями ($L = 100, r = 5$)	0,8	379 653	1,957
Циліндр ($R = 50, H = 100$)	0,4	1 186 810	1,983
Циліндр ($R = 50, H = 100$)	0,8	298 556	1,961
Циліндр з фасками ($R = 50, H = 100, c = 5$)	0,4	1 112 806	1,983
Циліндр з фасками ($R = 50, H = 100, c = 5$)	0,8	281 512	1,961
Циліндр з округленнями ($R=50, H=100, r=5$)	0,4	1 122 238	1,984
Циліндр з округленнями ($R=50, H=100, r=5$)	0,8	283 072	1,939
Конус ($R = 50, H = 100$)	0,2	3 165 800	1,970
Конус ($R = 50, H = 100$)	0,4	821 512	1,998
Конус ($R = 50, H = 100$)	0,8	205 938	1,979
Сфера ($R = 50$)	0,4	872 460	1,998
Сфера ($R = 50$)	0,8	217 722	2,001
Сфера ($R = 100$)	0,8	872 460	1,999
Сфера з отв. ($R = 100, r = 15$)	0,8	1 493 549	1,974
Сфера з отв. ($R = 100, r = 25$)	0,8	1 551 541	1,971
Сфера з 2-мя отв. ($R = 100, r = 25$)	0,8	1 720 679	1,962
Top ($R = 50, r = 5$)	0,2	1 165 832	1,978
Top ($R = 50, r = 5$)	0,4	297 664	1,984
Top ($R = 50, r = 5$)	0,8	75 264	1,942
Top ($R = 50, r = 10$)	0,2	2 438 816	1,981
Top ($R = 50, r = 10$)	0,4	611 664	1,973
Top ($R = 50, r = 10$)	0,8	156 480	1,959
Гелікоїд ($R = 50, H = 100$)	0,2	3 999 750	1,969
Гелікоїд ($R = 50, H = 100$)	0,4	1 012 474	1,929
Гелікоїд ($R = 50, H = 100$)	0,8	258 338	1,906
Пружина ($R = 50, r = 5, H = 100$)	0,2	5 604 720	1,976
Пружина ($R = 50, r = 5, H = 100$)	0,4	1 429 128	1,980
Пружина ($R = 50, r = 5, H = 100$)	0,8	362 232	1,939

3D моделі, як показують модельні дані, спостерігається квадратична залежність (коєфіцієнт $a = 2$).

Зі збільшенням розмірів ребер збільшується відхилення показника ступеня рівняння (3.11) від величини $a = 2$, що частково пояснюється особливостями тріангуляції поблизу контурів поверхонь. Таке відхилення більш проявляється зі збільшенням периметра контурів поверхонь моделі. Криволінійні контури, порівняно з прямолінійними, також призводять до більшої кількості трикутників і, відповідно, до впливу на коєфіцієнт a рівняння (3.11). Отже, коєфіцієнт a може характеризувати ступінь складності моделей у за такими характеристиками, як периметр і кривизна контурів поверхонь.

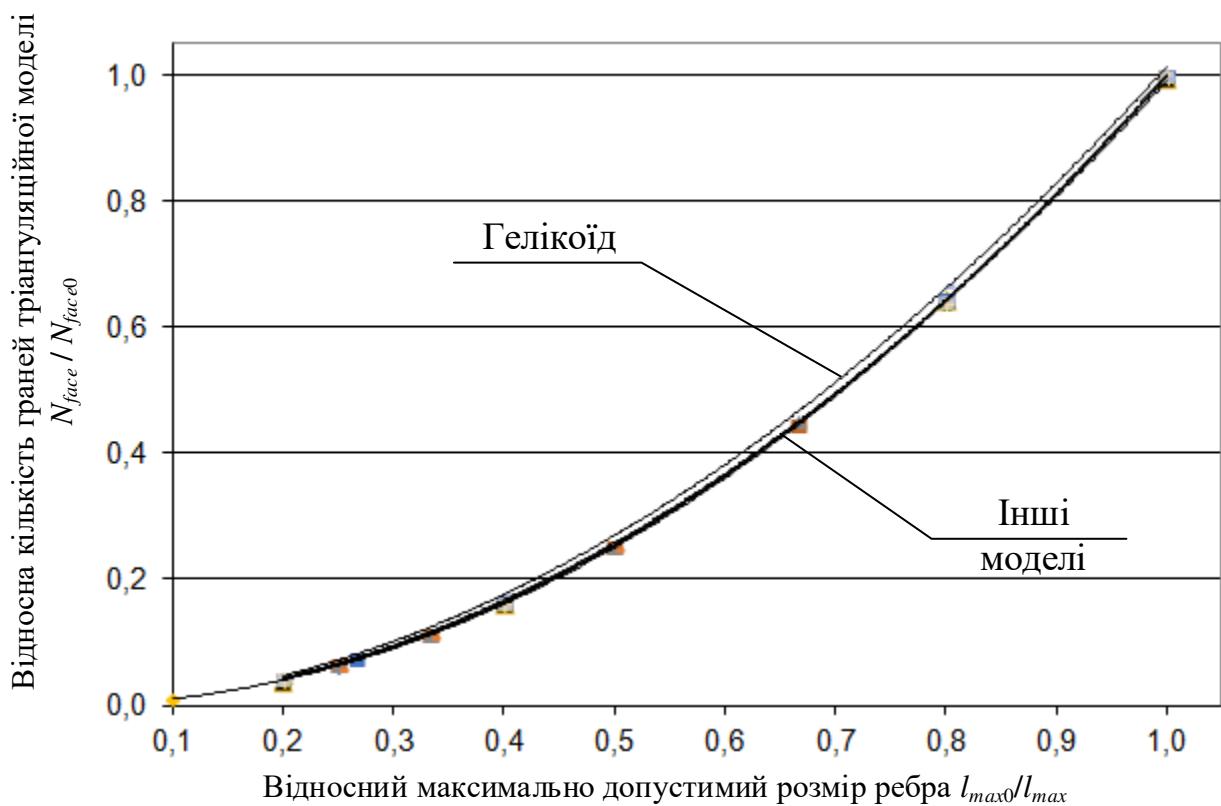
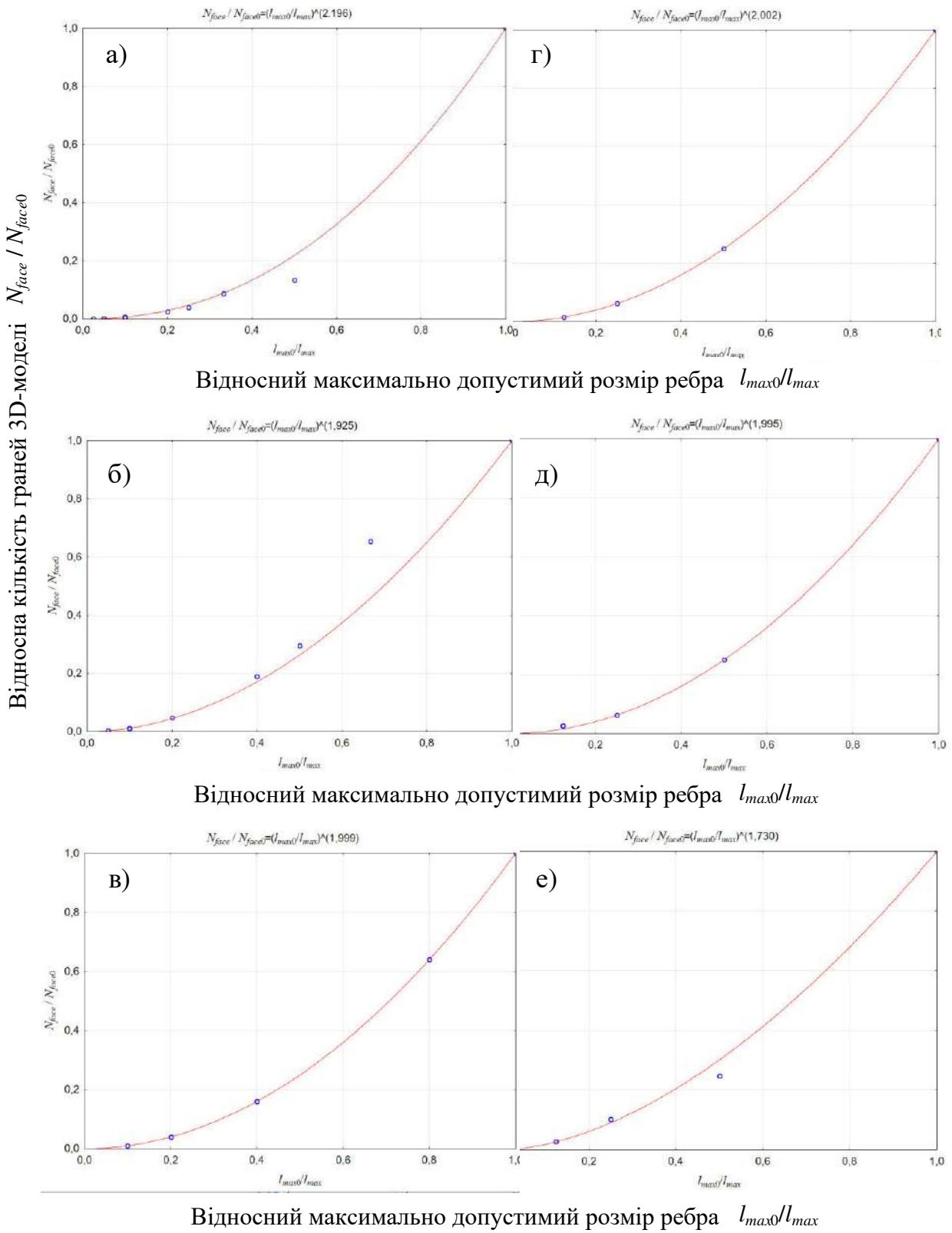


Рисунок 3.11 – Взаємозв'язок відносного максимально допустимого розміру ребра з відносною кількістю граней 3D-моделі (для базової моделі l_{max0}, N_{face0} в табл. 3.3)

Результати модельних досліджень (табл. 3.3) показали істотний вплив параметрів базової моделі на показник ступеня a , тому слід задавати l_{max0} , одинаковий для порівнюваних CAD-моделей. На рис. 3.12 представлено графік залежностей $y_N = f(x_l)$ для l_{max0} в діапазоні 0,2÷4,0 мм. Досліджені залежності



- a) $l_{max0} = 0,2 \text{ мм}; \delta) l_{max0} = 0,4 \text{ мм}; \varepsilon) l_{max0} = 0,8 \text{ мм};$
 ε) $l_{max0} = 1,0 \text{ мм}; \partial) l_{max0} = 2,0 \text{ мм}; e) l_{max0} = 4,0 \text{ мм}$

Рисунок 3.12 – Взаємозв’язок відносного максимально допустимого розміру ребра на відносну кількість граней 3D-моделі сфери ($R = 100 \text{ мм}$)

при $l_{max0} \in [0,8, 2]$ забезпечують мінімальне відхилення від модельних даних. Для забезпечення адекватної оцінки геометричної складності тестових виробів, представлених на рис. 3.10, за результатами аналізу залежності $y_N = f(x_l)$ задавалося мінімальне значення l_{max0} з раціонального діапазону — 0,8 мм. Результати оцінки геометричної складності тестових моделей промислових виробів на основі регресійного аналізу $y_N = f(x_l)$ представлено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати регресійного аналізу залежності кількості граней моделі N_{face} від максимально допустимого розміру ребер l_{max} для тестових моделей виробів

Тестова модель виробу (розміри, мм)	Кількість граней базової моделі ($l_{max0} = 0,8$ мм), N_{face0}	Коефіцієнт a рівняння (3.11)
1. Вал (60,0 x 60,0 x 216,5)	252 360	1,868
2. Шестерня (85,8 x 85,8 x 60,0)	321 468	1,844
3. Карданий вал (147,5 x 50,0 x 124,0)	330 292	1,822
4. Панель (151,5 x 195,5 x 20,1)	575 914	1,699
5. Кришка (83,9 x 101,3 x 43,2)	237 362	1,610
6. Вентилятор (92,0 x 92,0 x 26,0)	251 400	1,577

Графік кривих залежності відносної кількості граней 3D-моделі від відносної допустимої похибки тріангуляції для досліджуваних моделей промислових виробів представлено на рис. 3.13. Отримані коефіцієнти a (табл. 3.4) дозволяють кількісно оцінити геометричну складність 3D-моделі виробу. У порівнюваних моделях найбільше значення коефіцієнта отримано для валу, як для простої з набору тестових деталей. Модель вентилятора має найменше значення коефіцієнта a , а відповідно дана деталь має відносно складну геометрію. Графічне представлення функціональних залежностей також вказує на істотні відмінності. Візуальна оцінка геометричної складності деталей підтверджує результати аналізу (табл. 3.4).

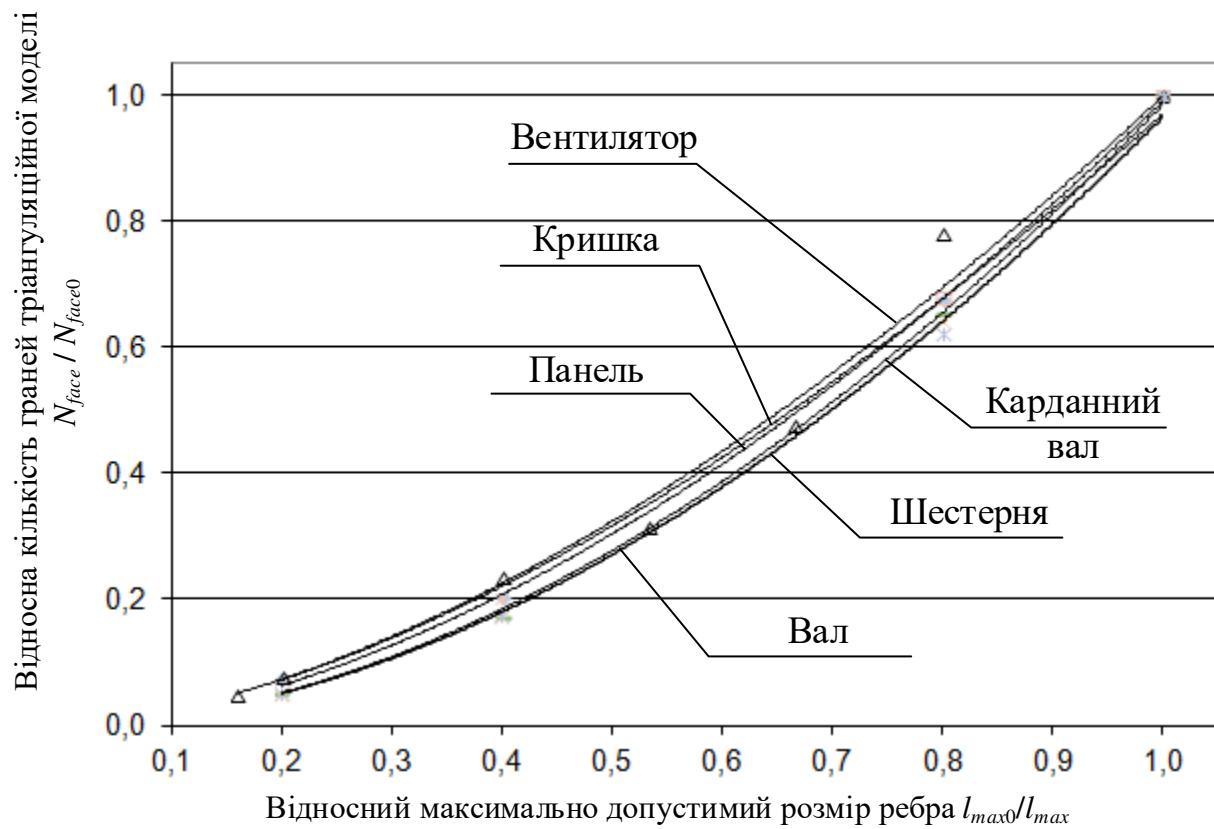


Рисунок 3.13 – Взаємозв'язок відносного максимально допустимого розміру ребра l_{max} з відносною кількістю граней 3D-моделі
(для базової моделі $l_{max0} = 0,8$ мм, N_{face0} в табл. 3.4)

Представлені в табл. 3.4 значення коефіцієнта рівняння (3.11) дозволяють науково обґрунтовано оцінювати складність виробу.

3.3.3 Дослідження залежності кількості граней 3D-моделі від допустимого двогранного кута між суміжними гранями

У дослідженні використано одну з найбільш поширених CAD-систем — Solidworks (Dassault Systemes Solidworks). В Solidworks передбачено завдання двох параметрів, що визначають процес тріангуляції поверхонь моделі: допустима похибка Δ_{max} та допустимий двогранний кут між суміжними гранями φ_{max} . Обидва параметри Δ_{max} і φ_{max} визначають з урахуванням складності геометрії поверхні (виду поверхні і обмежуючих її контурів) кількість трикутних граней. Відзначено особливість параметра φ_{max} у визначенні

кількості трикутників незалежно від абсолютнох розмірів 3D-моделі виробу. При завданні максимального допустимого значення параметра Δ_{max} стає можливим вивчення регресійної залежності кількості трикутних граней N_{face} від параметра тріангуляції φ_{max} .

Функціонально-регресійний аналіз залежності $N_{face} = f(\varphi_{max})$ виконувався в професійному статистичному пакеті Statistica (StatSoft, Inc.) і табличному редакторі MS Excel. Аналіз $N_{face} = f(\varphi_{max})$ для набору простих геометричних тіл (представлено на рис. 3.14) і декількох тестових моделей промислових виробів (рис. 3.10), дозволить виявити показники для оцінки геометричної складності моделі.

Оскільки абсолютна кількість трикутних граней для досліджених моделей істотно відрізняються, то для забезпечення порівняльного аналізу результатів і їх спільної оцінки виконувалось нормування досліджених ознак N_{face} і φ_{max} [204, 205].

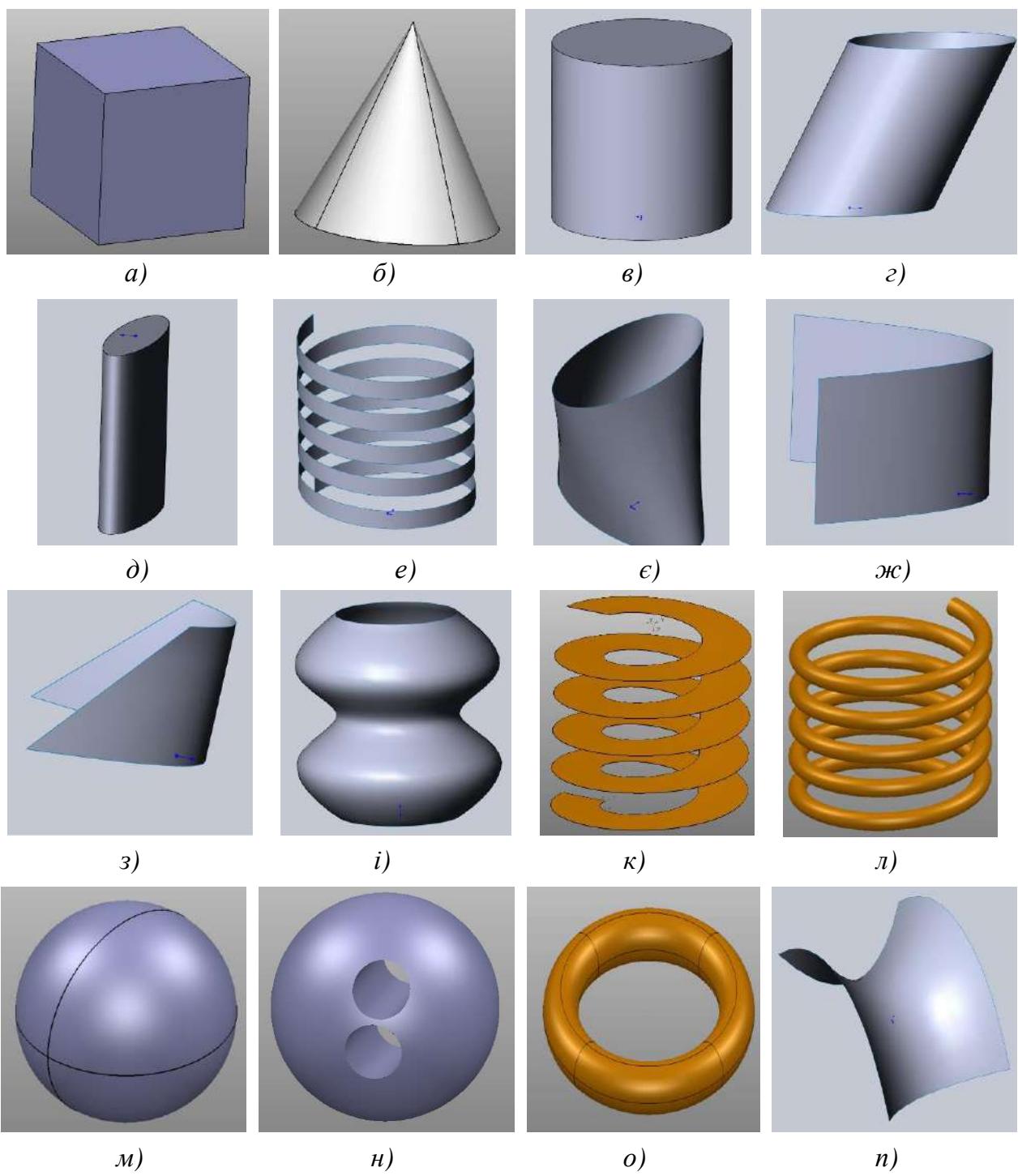
Перехід від абсолютнох значень досліджених ознак N_{face} , φ_{max} до відносних виконувався порівнянням з еталонним значенням [204]. В якості базової моделі приймається найбільш точна (з найменшою величиною параметра φ_{max}) з досліженого ряду тріангуляційних 3D-моделей. Регресійний аналіз виконувався для нормованих значень:

$$x_\varphi = \varphi_{max0} / \varphi_{max}, \quad y_N = N_{face} / N_{face0}, \quad (3.12)$$

де φ_{max0} , N_{face0} — досліджувані ознаки базової моделі (еталонні значення).

Запропоноване нормування (3.12) дозволяє перейти до діапазону значень $x_\varphi \in (0,1]$ і $y_N \in (0,1]$ для всього ряду тріангуляційних 3D-моделей, отриманих на основі вихідної CAD-моделі незалежно від її геометричних властивостей.

При аналізі залежності $y_N = f(x_\varphi)$ тріангуляційні 3D-моделі створювалися за CAD-моделлю з допустимим двогранним кутом між гранями $\varphi_{max} = 0,5 \div 2,5^\circ$. Мінімальне значення параметра φ_{max} визначено допустимим інтервалом в налаштуваннях системи Solidworks при збереженні 3D-моделі в STL-файл. Діапазон значень параметра φ_{max} визначався вимогами необхідної точності



а) куб; б) конус; в) циліндр; г) похилий круговий циліндр; д) еліптичний циліндр;
 е) циліндрична гвинтова смуга; ж, з) торси з двома параболами, що лежать в паралельних
 площинах; и) гофрована поверхня обертання загальної синусоїди;
 к) прямий гелікоїд; л) гвинтова поверхня циліндричної пружини; м) сфера;
 н) сфера з отворами; о) відкритий круговий тор; п) гіперболічний параболоїд

Рисунок 3.14 – 3D-моделі для аналізу залежностей досліджуваних ознак

тріангуляційної 3D-моделі для виготовлення виробу існуючими адитивними технологіями, і досить великого інтервалу, що дозволяє виявити особливості функціональної залежності $y_N = f(x_\varphi)$ для тестових моделей.

Визначення залежності $y_N = f(x_\varphi)$ для тестових моделей (див. рис. 3.10, 3.14) виконувалося при об'ємі вибірки $n = 5$ (кількість тріангуляційних 3D-моделей, створених на базі вихідної CAD-моделі). Критичне значення коефіцієнта кореляції становило $R_{cr} = 0,991$ для числа ступенів свободи $d_f = (r - 2) = 3$ і рівні значущості $\alpha = 0,001$.

За результатами регресійного аналізу залежності $y_N = f(x_\varphi)$ з використанням набору рівнянь узятих з роботи [221] та їх комбінацій виділено наступні два рівняння регресії, які забезпечують найменші значення максимального відносного відхилення від модельних даних:

$$y_N = x_\varphi^a, \quad (3.13)$$

$$y_N = ax_\varphi^2 + bx_\varphi + c, \quad (3.14)$$

де a, b, c – коефіцієнти рівнянь регресії.

Результати регресійного аналізу залежності $y_N = f(x_\varphi)$ з використанням рівнянь (3.13) і (3.14) представлено в табл. 3.5. Рівняння (3.13) дозволяє отримати мінімальне відхилення від вихідних даних для 3D-моделей з однією геометричною поверхнею. Рівняння (3.14) — для моделей з декількома геометричними поверхнями. На рис. 3.15 показано графік залежностей для досліджених 3D-моделей. Рівняння регресії (3.13) і (3.14) мають близькі за величиною коефіцієнти для 3D-моделей з різними абсолютною розмірами. На прикладі еліптичного циліндра значення коефіцієнтів рівнянь також не змінюються від співвідношення їх розмірів.

Конус і всі види циліндричних поверхонь мають близькі за величиною коефіцієнти рівнянь. Різниця між значеннями коефіцієнтів несуттєва і знаходиться в межах похибки їх визначення.

Таблиця 3.5 – Результати регресійного аналізу залежності кількості граней 3D-моделі від граничного значення двогранного кута між суміжними гранями φ_{max}

Модель (розміри, мм)	Кількість граней базової моделі $(\varphi_{max0}=0,5^\circ)$	Коефіцієнти рівняння			
		(3.19)		(3.20)	
		a	a	b	c
Куб з плоскими поверхнями	12	-	0	0	1
Конус з поверхнями торцевою плоскою і прямого кругового конуса	1 440	1,000	0	1,000	0
Циліндр з торцевими плоскими поверхнями і циліндричною поверхнею обертання	2 880	1,000	0	1,000	0
Похилий круговий циліндр	1 524	0,998	-0,001	1,000	0,001
Еліптичний циліндр	2 876	1,003	0	1,001	-0,001
Циліндрична гвинтова смуга	15 072	0,999	-0,001	1,001	0
Торс з двома еліпсами, що лежать в паралельних площинах	363 316	1,749	0,525	0,551	-0,076
Торс з двома параболами лежать в паралельних площинах (параболічний циліндр)	576	0,975	0,013	0,974	0,013
Торс з двома параболами (відрізняються розмірами), що лежать в паралельних площинах	93 950	1,969	0,982	0,019	-0,001
Гофрована поверхня обертання загальної синусоїди	993 600	1,958	0,980	0,021	-0,001
Прямий гелікоїд	15 464	0,880	-0,237	1,250	-0,013
Гвинтові поверхні циліндричної пружини	5 739 462	1,995	0,994	0,007	-0,001
Сфера	516 960	2,006	1,001	-0,001	0
Сфера з отвором (сферична і циліндрична поверхні)	510 982	1,984	0,994	0,006	0
Сфера з 2-ма отворами (сферична і циліндричні поверхні)	505 008	1,963	0,982	0,018	0
Відкритий круговий тор	1 036 800	2,000	1,002	-0,002	0
Гіперболічний параболоїд	238 207	2,122	1,129	-0,151	0,019

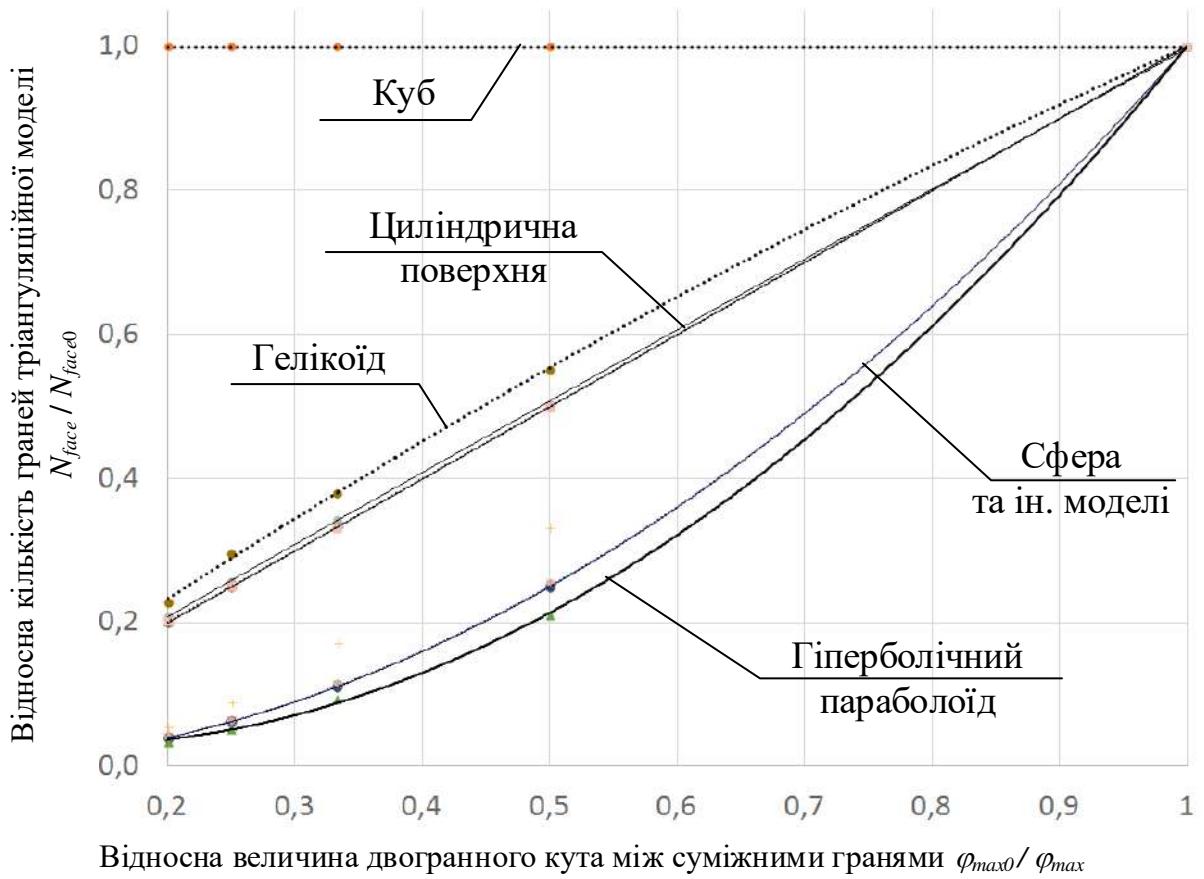


Рисунок 3.15 - Залежність відносної кількості граней моделі від відносного допустимого двогранного кута між суміжними гранями (двогранний кут для базової моделі $\varphi_{max0} = 0,5^\circ$, кількість граней базової моделі N_{face0} приведено в табл. 3.5)

Найбільш істотні відмінності функціональних залежностей $y_N = f(x_\varphi)$ спостерігаються між моделями куба, гелікоїда, циліндра, сфери та гіперболічного параболоїда. Тор і сфера мають одинакові коефіцієнти рівнянь регресії.

За наведеними в табл. 3.5 коефіцієнтам рівняння (3.14) спостерігається певний їх зв'язок з досліджуваними поверхнями. Тому виконувався аналіз кількості трикутних граней для окремих поверхонь стосовно моделі сфери з отвором (результати представлені в табл. 3.6). В результаті виявлено приблизну відповідність коефіцієнтів рівняння регресії з відносною кількістю граней сферичної N_{sph} і циліндричної поверхні N_{cil} для базової моделі. Коефіцієнт a — для поверхні сфери ($N_{sph} = 0,995$, при значенні коефіцієнта $a = 0,994$) і b — для циліндричної поверхні отвору ($N_{cil} = 0,005$ при $b = 0,006$).

Результати аналізу тестових моделей (табл. 3.5, 3.6) дозволяють стверджувати, що значення коефіцієнтів рівняння регресії (3.15) можна асоціювати з відносною кількістю трикутних граней, що належать окремим видам поверхонь: *a* - криволінійні поверхні обертання; *b* - лінійчатій поверхні обертання і плоскій з криволінійним контуром; *c* - плоскій з прямолінійним контуром (кількість граней не змінюється від параметра тріангуляції ϕ_{max}). Таким чином, на основі порівняння значень коефіцієнтів можлива оцінка геометричної складності виробів.

Таблиця 3.6 – Результати аналізу відносної кількості граней для окремих поверхонь моделі сфери з циліндричним отвором

Відносна похибка тріангуляції моделі, ϕ_{max0} / ϕ_{max}	Відносна кількість трикутних граней для поверхні	
	сферична	циліндрична (отвору)
1,00	0,995	0,005
0,50	0,990	0,010
0,33	0,985	0,015
0,25	0,980	0,020
0,20	0,976	0,024

У табл. 3.7 представлено результати функціонально-регресійного аналізу залежності $y_N = f(x_\phi)$ на прикладі ряду 3D-моделей промислових виробів.

Таблиця 3.7 – Результати регресійного аналізу залежності $y_N = f(x_\phi)$ для тестових 3D-моделей промислових виробів

Тестова модель (габаритні розміри, мм)	Кількість граней базової моделі $(\phi_{max0} = 0,5^\circ)$	Коефіцієнти рівняння			
		(3.13)		(3.16)	
		<i>a</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
1. Вал ($64 \times 64 \times 138$)	32 392	0,998	-0,001	1,001	0,000
2. Шнек ($40 \times 40 \times 144$)	1 335 306	1,077	-0,463	1,608	-0,145
3. Шестерня ($86 \times 86 \times 60$)	148 016	1,497	0,820	0,141	0,039
4. Карданний вал ($148 \times 50 \times 124$)	2 565 336	1,941	0,969	0,030	0,000
5. Панель ($152 \times 196 \times 20$)	15 810 732	1,881	0,924	0,079	-0,003
6. Кришка ($84 \times 101 \times 43$)	6 623 584	1,874	0,959	0,036	0,005
7. Вентилятор ($26 \times 92 \times 92$)	11 184 662	1,940	0,844	0,120	-0,015

За результатами оцінки 3D-моделей, наведених в табл. 3.7, рівняння (3.13) не є достатньо інформативним для реальних промислових виробів. Дане

рівняння має доцільне застосування при аналізі окремо виділених поверхонь, так як дозволяє визначити вид поверхні за значенням коефіцієнта відповідно до табл. 3.5.

Коефіцієнти рівняння (3.17) (табл. 3.7) дозволяють кількісно оцінити геометричну складність моделі виробу з урахуванням виявленої асоціації їх величин з відносною кількістю трикутних граней, що належать окремим видам поверхонь.

Для кращого розуміння отриманих співвідношень коефіцієнтів рівняння регресії залежності $y_N = f(x_\phi)$ слід враховувати отримані дані по окремим поверхням (табл. 3.5), які є найбільш поширеними в машинобудуванні. Наприклад, з розглянутих виробів (табл. 3.7) шnek виділяється негативними значеннями коефіцієнтів a, c . У табл. 3.5 приблизно аналогічне співвідношення коефіцієнтів відповідає моделі гелікоїда, що можна підтвердити візуальним аналізом 3D-моделі виробу, для якої поверхня гелікоїда є основною. Таким чином, можлива автоматизована оцінка геометричних особливостей (складності) окремо виділеної поверхні або виробу в цілому.

Отримані результати дослідження дозволяють науково обґрунтовано оцінювати геометричну складність виробу, яка є складовою конструктивно-технологічної складності [223], що визначає вибір ефективної стратегії виготовлення адитивними технологіями.

Одержані показники дозволяють на їх основі обґрунтовано визначати комплексні показники геометричної складності виробів.

3.4 Визначення показників складності промислових виробів

Основою для визначення показника геометричної складності можуть бути отримані рівняння регресії залежностей кількості граней 3D-моделі від основних параметрів тріангуляції (розд. 3.3):

$$\frac{N_{Face}}{N_{Face0}} = a \frac{\Delta_{max0}}{\Delta_{max}} + b \sqrt{\frac{\Delta_{max0}}{\Delta_{max}}} + c, \quad (3.18)$$

$$\frac{N_{Face}}{N_{Face0}} = \left(\frac{l_{max0}}{l_{max}} \right)^d, \quad (3.19)$$

$$\frac{N_{Face}}{N_{Face0}} = a \left(\frac{\varphi_{max0}}{\varphi_{max}} \right)^2 + b \frac{\varphi_{max0}}{\varphi_{max}} + c, \quad (3.20)$$

де Δ_{max0} , l_{max0} , φ_{max0} , N_{Face0} – параметри тріангуляції CAD-моделі виробу і кількість граней 3D-моделі, прийнятої в якості базової - найбільш точної з досліджуваного ряду тріангуляційних 3D-моделей.

За результатами дослідження моделей (розд. 3.3) виявлено, що значення коефіцієнтів рівнянь (3.18) і (3.20) можна асоціювати з відносною кількістю трикутних граней, що належать окремим видам поверхонь: a - криволінійній поверхні обертання; b - лінійчатій поверхні обертання і плоскій з криволінійним контуром; c - плоскій з прямолінійним контуром (кількість граней не змінюється від параметра тріангуляції Δ_{max} або φ_{max}). Коефіцієнт d рівняння (3.19) може характеризувати ступінь складності 3D-моделі за довжиною периметра криволінійних контурів поверхонь. Наприклад, для сфери, яка не має обмежуючих контурів, коефіцієнт $d = 2$. Зі збільшенням периметра криволінійних контурів у тестових 3D-моделях виробів (табл. 3.7) коефіцієнт d також росте.

З урахуванням особливостей пошарової побудови зростання рівня технологічності конструкції виробу можливе при збільшенні відносної площини плоских і циліндричних поверхонь, що мають меншу кількість орієнтацій та менший периметр криволінійних контурів. Отже, враховуючи визначені асоціювання коефіцієнтів b , c , d рівнянь регресії (3.18)-(3.20), показник геометричної складності пропонується визначати за такою залежністю:

$$K_G = d(b + c)/2, \quad (3.21)$$

де b , c – коефіцієнти рівняння регресії (3.18) або (3.20);

d – коефіцієнт рівняння регресії (3.19).

У визначені показника геометричної складності за (3.21) не враховується

коефіцієнт a рівняння регресії (3.18) або (3.20) з урахуванням раніше визначеної умови (3.4).

Слід також враховувати, що геометрична складність обмежується мінімально допустимими значеннями радіусу кривизни поверхні, товщини стінок та розмірів елементів конструкції.

В якості додаткових показників геометричної складності виробів слід розглядати показники, які визначаються особливостями вирішення окремих задач технологічної підготовки. Наступні задачі найбільш істотно впливають на ефективність АМ-процесів [73, 91]: структурна оборотна декомпозиція, раціональна орієнтація та розміщення виробів на робочій платформі установки.

В якості показника структурної оборотної декомпозиції приймаємо коефіцієнт, що характеризує можливість розміщення виробу на робочій платформі установки:

$$K_{GD} = \begin{cases} \frac{L_{max}}{L_{Wmax}}, & \text{если } L_{min} \leq L_{Wmin} \text{ и } L_{mean} \leq L_{Wmean} \\ \frac{L_{max} L_{mean}}{L_{Wmax} L_{Wmean}} & \text{если } L_{min} \leq L_{Wmin} \text{ и } L_{mean} > L_{Wmean}, \\ \frac{V_{Box}}{V_W}, & \text{если } L_{min} > L_{Wmin} \text{ и } L_{mean} > L_{Wmean} \end{cases}$$

де L_{min} , L_{mean} , L_{max} – мінімальний, середній і максимальний габаритний розмір виробу відповідно;

L_{Wmin} , L_{Wmean} , L_{Wmax} , V_W – мінімальний, середній, максимальний розмір і об'єм робочого простору установки відповідно;

V_{Box} – об'єм паралелепіпеда, що описує виріб.

При коефіцієнти $K_{GD} > 1$ потрібна оборотна структурна декомпозиція виробу для ефективного розміщення його частин в робочому просторі установки. Величина K_{GD} приблизно відповідає необхідній кількості завантажень установки для створення виробу по частинах за умови низької ефективності вирішення задачі по їх декомпозиції.

Коефіцієнт прогнозованої ефективності декомпозиції виробу:

$$K_{GDE} = 1 - V_{Part} / V_{Box}, \quad (3.22)$$

де V_{Part} – об'єм виробу.

Величина коефіцієнта $K_{GDE} > 0.7$ буде вказувати на потребу і потенційну ефективність використання оборотної структурної декомпозиції виробу.

Складність вирішення задачі раціональної орієнтації пов'язана з великою кількістю обмежуючих факторів [74, 102, 109]. Основною інформацією для визначення раціональної орієнтації виробу є коефіцієнти одиничних векторів для нормалей граней тріангуляційної моделі виробу.

Нерівномірний розподіл кутів нахилу нормалей граней є характерною ознакою для 3D-моделей виробів, які мають більш просте рішення задачі по їх раціональній орієнтації. Прикладами, що підтверджують таке припущення, можуть служити моделі сфери і циліндра обертання. Сфера має рівномірний розподіл кутів нахилу нормалей, при цьому задача орієнтації виробу не має раціонального рішення. Циліндр обертання має рівномірний розподіл кутів нахилу нормалей тільки в одній площині. Для циліндра така задача має рішення з точним визначенням кутів нахилу моделі для орієнтації осі циліндра паралельно осі Z (вектору напрямки побудови).

Виходячи з вище наведеного прикладу рівномірність розподілу нахилу нормалей граней слід розглядати в сферичній системі координат.

Перехід від коефіцієнтів N_x, N_y, N_z одиничного вектору нормалі грані до кутів θ, φ у сферичній системі координат виконується за наступними залежностями [206]:

$$\theta = \arctg \left(\frac{\sqrt{N_x^2 + N_y^2}}{N_z} \right), \quad \varphi = \arctg \left(\frac{N_y}{N_x} \right). \quad (3.23)$$

Показником ефективності раціональної орієнтації виробу може служити коефіцієнт концентрації щільності розподілу кутів нахилу нормалей трикутних граней моделі (θ і φ у сферичній системі координат):

$$K_{GO} = \frac{1}{2} \sum_{i,j}^{n,m} |D_{ij} - d_{ij}|, \quad (3.24)$$

де n, m – число інтервалів для кутів $\theta \in [0, 180]$ і $\varphi \in [0, 360]$ нахилу нормалей трикутних граней моделі відповідно (рекомендоване значення $n = 4 \div 6$, $m = 2n$);

D_{ij}, d_{ij} – відносна площа граней, що потрапляють в ij -ю область значень кутів θ і φ нахилу нормалей для моделі виробу і сфери відповідно, $d_{ij} = 1/nm$;

Модель сфери за залежністю (3.24) буде мати коефіцієнт $K_{GO} = 0$, в даному випадку задача орієнтації виробу не має раціонального рішення. Отримання порівняно більшого за величиною коефіцієнта K_{GO} буде вказувати на можливість визначення менших за розміром області значень кутів θ, φ нахилу виробу для раціональної його орієнтації.

Показником раціонального розміщення виробів на робочій платформі установки приймаємо коефіцієнт, що характеризує ефективність використання об'єму робочого простору:

$$K_{GP} = \frac{V_{Part}}{S_W H_{Load}},$$

де S_W – площа робочої платформи установки;

H_{Load} – висота виробів (за напрямком побудови), розміщених на робочій платформі.

Задача щодо ефективного використання об'єму робочого простору є актуальною для більшості методів виготовлення адитивними технологіями.

Складність структури матеріалів визначається кількістю компонентів матеріалу n_M і характером їх розподілу в об'ємі виробу. В якості ступеня складності характеру розподілу можна взяти число координатних осей n_P , за якими розподіляються структурні елементи матеріалу. Для пошарового розташування структурних елементів – $n_P = 1$, строчками – $n_P = 2$ та точками – $n_P = 3$.

Показник складності структури матеріалів K_S слід визначати за такою залежністю:

$$K_S = \frac{1}{n_M n_P},$$

де n_M – число компонентів матеріалу;

n_P – число координатних осей розподілу структурних елементів матеріалу в об'ємі виробу.

Складність структури обмежується технологічними можливостями установки за кількістю використаних матеріалів, мінімальними розмірами структурних елементів та їх розміщенням у робочому просторі.

Показник ієрархічної складності K_H визначається числом рівнів структур n_S у виробі:

$$K_H = \frac{1}{n_S}.$$

Основним обмеженням для ієрархічної складності є мінімально допустимі розміри елементів і можливість звільнення пустотілих замкнутих об'ємів виробу від невикористаного вихідного матеріалу (для методів виготовлення SLA, SLS і SLM).

Додатковим показником ієрархічної складності виробу є коефіцієнт геометричної складності ієрархічної структури:

$$K_{HG} = 1 - \frac{N_{FaceInner}}{N_{Face}},$$

де N_{Face} , $N_{FaceInner}$ – кількість граней у цілому тріангуляційної моделі і внутрішніх оболонок відповідно.

Якщо в наявності є лише одна оболонка для моделі виробу (тобто модель не має внутрішніх структур або пустот), тоді $N_{FaceInner} = 0$ і відповідно коефіцієнт $K_{HG} = 1$.

Основні проблеми для створення функціональних виробів безпосередньо побудовою адитивними технологіями пов'язані з

формоутворенням контактуючих та замкнутих внутрішніх поверхонь. Формоутворення поверхонь з мінімальним зазором між частинами виробу погіршує їх якість та ускладнює доступ до них для постобробки. Збільшення площі таких поверхонь буде призводити до зниження технологічності виробу.

Показник функціональної складності K_F слід визначати за наступною залежністю:

$$K_F = 1 - \frac{S_{Contact} + S_{Inside}}{S_{Part}},$$

де $S_{Contact}$ – сумарна площа трикутних граней поверхонь з мінімально допустимим зазором між частинами виробу;

S_{Inside} – сумарна площа трикутних граней внутрішніх поверхонь, що вимагають постобробки;

S_{Part} – сумарна площа трикутних граней моделі виробу.

Функціональна складність обмежується мінімально допустимим зазором між частинами виробу, забезпеченням доступу до поверхонь, що вимагають постобробки і необхідністю звільнення замкнених об'ємів, які утворилися між частинами виробу, від невикористаного вихідного матеріалу.

Основними критеріями ефективності конструкторської підготовки виробництва є збільшення показників складності виробу та відносне зменшення об'єму використаного матеріалу у виробі:

$$K_V = \frac{V_{Part}}{V_{Part0}},$$

де V_{Part0} , V_{Part} – об'єм виробу спочатку заданої конструкції і після конструкторської підготовки відповідно.

3.5 Показник технологічності щодо ефективності оборотної структурної декомпозиції виробу

Однією з основних задач технологічної підготовки (рис. 1.7) є структурна оборотна декомпозиція виробу [73, 118].

Не зважаючи на достатню кількість робіт [120, 224-227] щодо рішення даної задачі досі відсутня методична основа для оцінки технологічності конструкції виробу стосовно його раціональної структурної декомпозиції з урахуванням вирішення подальшої задачі розміщення в робочому просторі побудови. Тому для відпрацювання конструкції виробу на пристосованість до визначення раціональної структурної декомпозиції необхідно розробити спеціальну оцінку технологічності, що враховує особливості адитивних технологій.

Основна проблема полягає в тому, що для виробів зі складною геометрією, які, як правило, виготовляються адитивними технологіями, є важливим враховувати розподіл елементарних об'ємів в просторі [119]. Існуючі підходи [120, 224-227] по декомпозиції виробів, побудовані на основі аналізу поверхні тріангуляційної або CAD-моделі не у всіх випадках дають найбільш раціональні варіанти щодо заповнення об'єму робочого простору побудови.

Статистичний аналіз розподілу елементарних об'ємів виробу може дозволити оцінювати технологічність їх конструкції стосовно їх структурної декомпозиції і розміщення в робочому просторі установки адитивних технологій.

На початковому етапі конструкторської та технологічної підготовки матеріалізації виробу адитивними методами виконується відпрацювання конструкції виробу на технологічність. Для цього завдання потрібна кількісна оцінка за пристосованістю конструкції виробу для ефективної реалізації технологічних процесів пошарової побудови. Як правило, використовують відносні показники (рівень технологічності), що приводять до єдиного діапазону значень $K \in [0, 1]$ [69].

В якості найбільш представницької досліджуваної ознаки тріангуляційної 3D-моделі з урахуванням робіт [119-121, 225-227] для раціональної декомпозиції виробу та подального його розміщення в робочій області побудови, використовується відносний об'єм яку він обіймав по відношенню до паралелепіпеду, що його описує:

$$K_V = V_{Part} / V_{Box}, \quad (3.25)$$

де V_{Part} – об'єм виробу або його структурної частини, V_{Box} – об'єм паралелепіпеда, що описує виріб по його габаритам або об'єм робочого простору.

Вибір розмірів паралелепіпеда, що описує виріб або його структурну частину при визначенні V_{Box} , виконується за наступними випадками:

- при виготовленні суцільного виробу та окремого завантаження установки за розмірами платформи та висоті побудови;
- при виконанні завдань структурної декомпозиції та щільного розміщення виробів за його габаритними розмірами.

Відповідно до існуючих підходів [203] за оцінкою технологічності та залежністю (3.25) для максимального використання робочого простору пошарової побудови установки (щільного розміщення виробів або їх частин) пропонується наступний показник:

$$K_{GDE} = 1 - V_{Part} / V_{Box}, \quad (3.26)$$

де V_{Part} – об'єм виробу.

Величина V_{Box} повинна визначатися як об'єм паралелепіпеда, що описує виріб при спільному розміщенні виробів на платформі установки. У разі завантаження на платформу тільки одного виробу V_{Box} відповідає об'єму робочого простору установки:

$$V_{Box} = L_X \cdot L_Y \cdot H_Z,$$

де L_X, L_Y – розміри платформи установки за осями X, Y ; H_Z – висота побудови (для SLS - висота завантаження вихідного матеріалу) для даного виробу.

Наприклад, для виготовлення виробу у формі паралелепіпеда з розмірами, що дозволяють повністю заповнити робочий простір обраної АМ-установки тоді коефіцієнт $K_{GDE} = 1$, тобто такий виріб буде найбільш технологічним щодо завдання раціонального розміщення при пошаровій побудові. За умови розбіжності розмірів паралелепіпеда з розмірами робочого простору такий виріб буде мати найбільшу технологічність для завдання структурної оборотної

декомпозиції.

Показник K_{GDE} , одержаний за залежністю (3.26), дозволяє виконати попередню оцінку технологічності виробу. Але при цьому не враховується просторовий розподіл матеріалу виробу. На практиці адитивними технологіями виготовляються вироби, складні за геометрією форм та просторового розподілу матеріалу, тому використання залежності (3.26) матиме суттєві обмеження по застосовності. При структурній декомпозиції виробу на N_p - частин, коли $N_p \rightarrow \infty$ може мати місце застосування залежності (3.26) для визначення рівня технологічності. Так як збільшення частин структурної декомпозиції виробу призводить до збільшення трудомісткості оборотної процедури (збірки частин в цілий виріб), то на практиці присутні обмеження. Слід шукати відповіді щодо раціональної кількості розбиття на N_p – частин на основі експериментальних досліджень. Також правильно визначати K_V з урахуванням N_p .

Для врахування розподілу елементарних об'ємів виробу (матеріалу) в просторі потрібно виконувати перехід від вихідної тріангуляційної 3D-моделі до воксельної моделі. Такий перехід забезпечує можливість виконання статистичного аналізу розподілу матеріалу за підпросторами (частинам розбиття) робочого простору АМ-установки.

Запропоновано оцінювати технологічність конструкції виробу стосовно до задачі декомпозиції виходячи з наступних передумов:

- максимізація займаного об'єму в робочому просторі пошарової побудови установки;
- кратність розмірів частин розбиття габаритних розмірів платформи заданої установки при однаковому розмірі по осі Z (вектору напрямку побудови);
- кількість частин розбиття робочого простору з заповненням матеріалом виробу і повністю порожніми визначають рівень технологічності;
- загальну кількість частин розбиття виробу необхідно мінімізувати для забезпечення менших витрат при складанні частин в цілий виріб.

З урахуванням практичного досвіду впливу кількості порожніх

підпросторів, отриманих в результаті розбиття (декомпозиції), на рівень технологічності конструкції, запропоновано залежність (3.26) за аналогією замінити наступною:

$$K_V = 1 - \frac{N_{V0}}{N_p}, \quad (3.27)$$

де N_p , N_{V0} – загальна кількість підпросторів та не заповнених матеріалом виробу.

Запропонований показник технологічності конструкції, стосовно раціональної структурної оборотної декомпозиції виробу, як показали результати дослідження (розд. 4), дозволяє з досить високою інформативністю оцінювати пристосованість конструкції до його виготовлення адитивними методами пошарової побудови.

3.6 Основні показники технологічності конструкції виробу

Основні показники технологічності конструкції виробу (ТКВ) характеризують найбільш важливі його властивості та дозволяють оцінювати технологічність в цілому.

До складу робіт із забезпечення ТКВ на етапі виготовлення входять заходи щодо зниження трудомісткості, матеріаломісткості, енергоємності та технологічної собівартості виробу [68, 69].

Показник трудомісткості виробу.

Трудомісткість виробу, як показник ТКВ, характеризує кількість праці, що витрачається на один виріб з урахуванням його конструктивних особливостей [68].

Технологічний час створення виробу для більшості способів виготовлення адитивними технологіями визначається наступною залежністю [15]:

$$T_{Build} = \sum_{i=1}^{n_{Load}} \frac{T_{Home} + T_{Add} + T_{Work} + T_{End}}{N_{Load}}, \quad (3.28)$$

де T_{Home} – час на підготовчі операції;

T_{Add} – час на пошарову побудову додаткових технологічних елементів;

T_{Work} – час на пошарове формоутворення виробів;

T_{End} – час на заключні операції;

N_{Load} – кількість створюваних виробів;

n_{Load} – кількість багаторазових завантажень установки при виготовленні виробу розбитого на частини з використанням принципу зворотної структурної декомпозиції або групи виробів [73].

Складова T_{Work} у залежності (3.28) є найбільшою. Час на пошарове формоутворення T_{Work} залежить від досить великого набору технологічних параметрів, але в основному - від висоти виробів (у напрямку побудови), розміщених на робочій платформі H_{Load} , і товщини шарів h_{Layer} .

Технологічний час T_{Build} істотно залежить від складності виробу [219, 228], тому слід враховувати запропоновані показники складності при порівняльній оцінці трудомісткості виготовлення для різних виробів.

Питомим показником трудомісткості прийнято технологічний час виготовлення, що припадає на одиницю об'єму виробу:

$$K_T = \frac{T_{Build}}{V_{Part}}.$$

Число шарів побудови виробу визначається відношенням висоти виробів H_{Load} до товщини шарів h_{Layer} (для стратегії нарізки моделі з постійним кроком). Враховуючи найбільш істотний вплив цих параметрів на час побудови T_{Work} в якості додаткового показника слід визначати наступний коефіцієнт:

$$K_{GLE} = \frac{n_{L(min)}}{n_L},$$

де n_L – число шарів побудови виробу для заданої стратегії нарізки моделі;

n_{Lmin} – мінімально можливе число шарів для виробу з урахуванням технологічних можливостей обладнання, $n_{Lmin} = L_{min} / h_{Lmax}$;

L_{min} – мінімальний габаритний розмір виробу;

$h_{L\max}$ – максимально допустима товщина шару.

Коефіцієнт K_{GLE} можна використовувати як критерій ефективності стратегії пошарової побудови виробу.

Показник матеріаломісткості виробу. Матеріаломісткість виробу, як показник ТКВ, характеризує кількість матеріальних ресурсів, необхідних для створення одного виробу з урахуванням його конструктивних особливостей [68].

Оцінка матеріаломісткості в сфері виробництва виконується з урахуванням технологічних особливостей обраного методу виготовлення. Для визначення об'єму використаного матеріалу на виготовлення виробу адитивними технологіями слід враховувати такі складові: об'єм підтримуючих структур $V_{support}$ (для SLA і FDM), об'єм невикористаного вихідного матеріалу V_{unused} (для SLS, SLM і LOM), об'єм внутрішніх структур V_{l_str} (lattice structure – гратчасті структури, загальна особливість адитивних технологій за можливостями суттєвого зниження матеріаломісткості).

Об'єм вихідного матеріалу, використованого на створення виробу, що визначається за наступною залежністю:

$$V_M = K_{Shrink} V_{Part} + K_S V_{Support} + (1 - K_U) V_{Unused} - K_L V_{L_str},$$

де V_{part} , $V_{support}$, V_{unused} , V_{l_str} – об'єм вихідної моделі виробу, структур підтримки, невикористаного матеріалу і внутрішніх структур відповідно;

K_{Shrink} – об'ємний коефіцієнт усадки матеріалу;

K_S , K_L – коефіцієнти відносного заповнення матеріалом об'єму підтримуючих та гратчастих структур відповідно, $K_S \in [0,1]$, $K_L \in [0,1]$;

K_U – коефіцієнт подальшого використання нереалізованого вихідного матеріалу, $K_U \in [0,1]$.

Додатково до абсолютних значень матеріаломісткості виробу в якості показника технологічності слід використовувати питому матеріаломісткість:

$$K_M = \frac{V_{Part}}{V_M}.$$

Показник енергоємності виробу. Енергоємність виробу, як показник ТКВ, характеризує кількість енергетичних ресурсів, необхідних для створення одного виробу [68]. Енергоємність визначається за її питомими складовими в залежності від методу виготовлення [219]:

$$E_{Build} = E_{Start-up} + e_{Time} T_{Build} + e_{Layer} l + e_V V_{Part} + E_{Shutdown},$$

де $E_{Start-up}$, $E_{Shutdown}$ – витрати енергії для виконання процедур на установці до формоутворення і після нього відповідно;

e_{Time} , e_{Layer} , e_V – питомі енергоємності для часу побудови T_{Build} , кількості шарів l і об'єму виробу V_{Part} .

Додатковий безрозмірний показник – питома енергоємність виробу:

$$K_E = \frac{E_{Build}}{V_{Part}}.$$

Показник технологічної собівартості виробу. Технологічна собівартість виробу, як показник ТКВ, характеризує у вартісному вираженні ресурсоємності виробу з урахуванням його конструктивних особливостей [68, 69]. На етапі виготовлення визначається за наступною залежністю:

$$C_{Build} = T_{Build} c_T + V_M \rho_M c_M + E_{Build} c_E,$$

де c_T , c_M , c_E – питомі складові собівартості для технологічного часу виготовлення T_{Build} , маси матеріалу $V_M \rho_M$ та витраченої енергії E_{Build} відповідно;

ρ_M – питома щільність матеріалу виробу.

Рівень технологічності K_L визначається за одним або кількома частинними і комплексними показниками, прийнятими в якості критеріїв оцінки технологічності конструкції [68, 69]. Допустимі межі значень K_L визначаються дослідним шляхом стосовно конкретних виробничих умов.

Висновки за розділом.

1. Оцінку технологічності конструкції виробу, що виготовляється адитивними технологіями, необхідно виконувати на основі аналізу тріангуляційної, воксельної та пошарової 3D-моделі за складовими складності виробу: геометричної, структури матеріалів, ієрархічної та функціональної. Запропоновані показники складності виробу забезпечують науково обґрунтовану оцінку відповідності конструкторських вимог вибору стратегії виготовлення.
2. Створена основа для оцінки технологічності конструкції виробів, одержуваних адитивними методами пошарової побудови. На основі існуючих підходів та з урахуванням можливостей і особливостей АМ-процесів, запропоновано систему показників складності і технологічності конструкції виробів. Отримані показники технологічності дозволяють на етапі конструкторської і технологічної підготовки відпрацьовувати конструкцію виробу з урахуванням особливостей підготовки АМ-процесів.
3. Запропонована та обґрунтована наукова гіпотеза про те, що аналіз впливу параметрів тріангуляції (допустимої похибки, максимально допустимих значень розміру ребра, а також двогранного кута між суміжними гранями) на кількість трикутних граней, що замінюють поверхню в CAD-системі, може дозволити оцінювати геометричну складність виробів, а отже — технологічність їх виготовлення адитивними методами пошарової побудови.
4. Перехід від абсолютних значень досліджуваних ознак до відносних шляхом порівняння з еталонними значеннями забезпечує можливість спільної оцінки результатів дослідження незалежно від геометричної складності моделі. В якості еталонних прийнято значення відповідних досліджених ознак тріангуляційної 3D-моделі з мінімальними параметрами тріангуляції (найбільш точної) з дослідженого ряду 3D-моделей.
5. Результати регресійного аналізу залежності кількості трикутних граней від допустимої похибки, максимально допустимих значень розміру

ребра, а також двогранного кута між суміжними гранями тріангуляції для тестових 3D-моделей, дозволяють стверджувати, що значення коефіцієнтів рівняння регресії можна асоціювати з відносною кількістю трикутних граней, що належать окремим видам поверхонь: криволінійній поверхні обертання (наприклад, сферична); лінійчатій поверхні обертання і плоский з криволінійним контуром (наприклад, циліндрична та пласка з криволінійним контуром); плоский з прямолінійним контуром (кількість граней не змінюється від параметра тріангуляції). Таким чином, на основі порівняння значень коефіцієнтів можлива науково обґрунтована оцінка геометричної складності виробів.

6. Аналіз залежності кількості трикутних граней від максимально допустимого значення двогранного кута між суміжними гранями для тестових 3D-моделей дозволив одержати рівняння, яке не є інформативним для реальних промислових виробів. Дане рівняння має доцільне застосування при аналізі окремо виділених поверхонь, оскільки дозволяє визначити вид поверхні за значенням коефіцієнта без урахування абсолютнох значень їх габаритних розмірів.

7. Аналіз залежності кількості трикутних граней від параметрів тріангуляції для тестових 3D-моделей дозволив виявити рівняння для оцінки геометричної складності конструкції виробу. Значення коефіцієнтів рівняння можна асоціювати з відносною кількістю трикутних граней, що належать окремим видам поверхонь, а також може характеризувати ступінь складності 3D-моделі за довжиною периметра криволінійних контурів поверхонь.

РОЗДІЛ 4

МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ КОМПЛЕКСНОЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА

У цьому розділі науково обґрунтовано методологічні основи комплексної технологічної підготовки адитивного виробництва складних виробів. Представлено необхідне інформаційне та алгоритмічне забезпечення, що створює основу для розробки системи технологічної підготовки матеріалізації складних виробів адитивними методами.

Запропонована методологія комплексної технологічної підготовки передбачає спільне вирішення таких оптимізаційних задач: структурна оборотна декомпозиція виробів, раціональна їх (або їх частин) орієнтація і розташування в робочому просторі побудови установки з подальшим пошаровим їх розсіченням за вибраною стратегією.

4.1 Проблема реалізації комплексної технологічної підготовки стосовно до адитивного виробництва

Потреба в комплексній технологічній підготовці матеріалізації складних виробів адитивними методами обґрунтовується наступними факторами:

- низька ефективність вирішення оптимізаційних задач за традиційною схемою виконання технологічної підготовки (на рис. 4.1 представлена традиційна схема вирішення задач [229]);
- можливість розв'язання оптимізаційних задач технологічної підготовки на основі єдиних критеріїв і, відповідно, вибору універсального набору цільових функцій;
- можливість істотного збільшення кількості варіантів вирішення (підбору технологічних параметрів) задач технологічної підготовки.

За представленою традиційною схемою вирішення оптимізаційних задач (рис. 4.1) кількість варіантів рішень зводиться до мінімуму, що принципово спрощує весь етап технологічної підготовки 3D-моделі, до матеріалізації за допомогою адитивних методів пошарової побудови. Такий підхід дозволяє

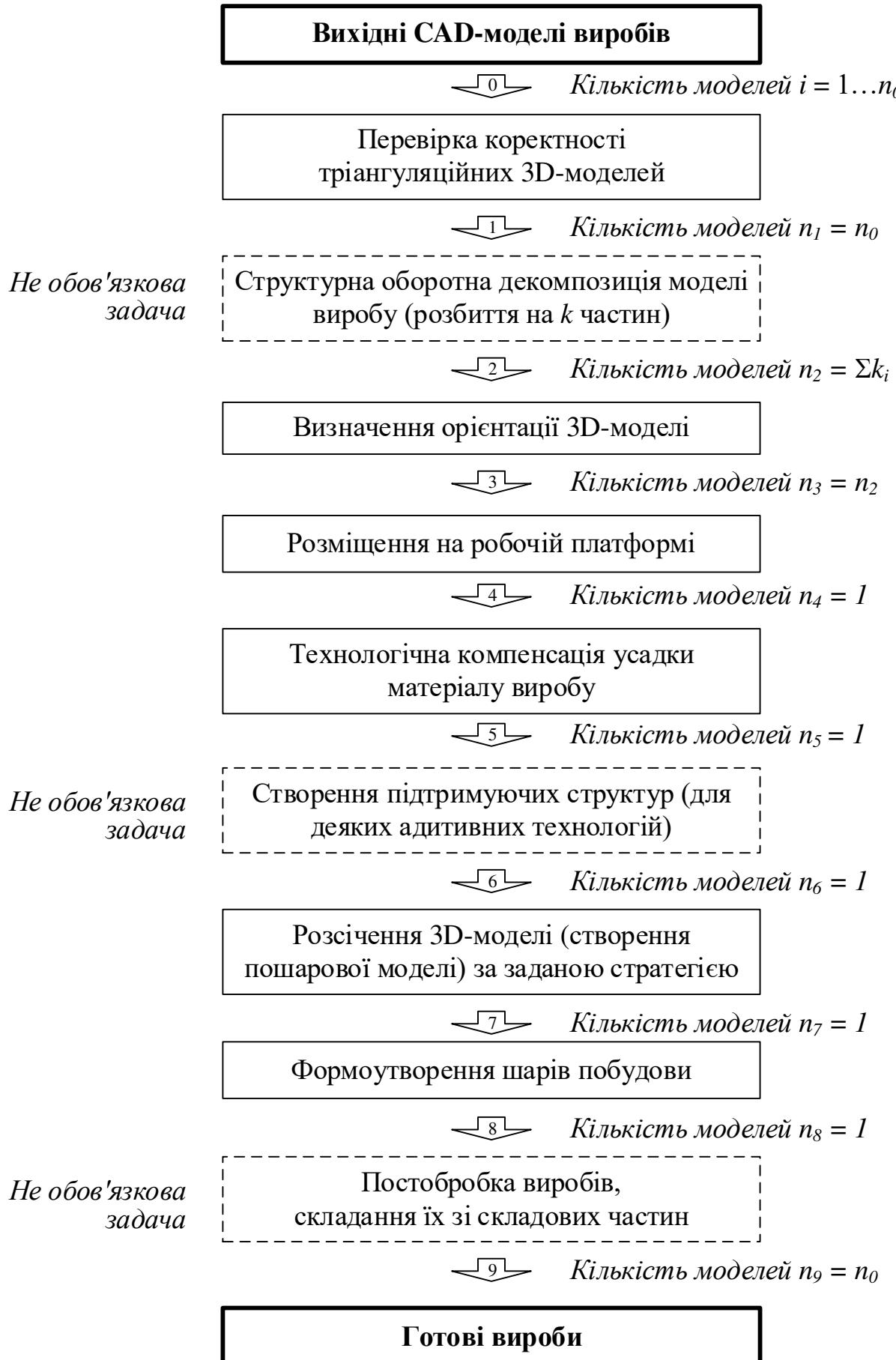


Рисунок 4.1 – Традиційна схема вирішення задач на етапі планування технологічної підготовки АМ-процесів

реалізувати планування технологічного процесу виготовлення за мінімальні терміни. Зворотною стороною, простій в реалізації такої послідовної схеми вирішення задач, є принципова обмеженість області пошуку раціональних значень технологічних параметрів.

Зроблено припущення, що комплексна технологічна підготовка на основі спільногорозв'язання оптимізаційних задач дозволить усунути недоліки існуючої послідовної схеми планування (рис. 4.1).

Основна проблема реалізації комплексної технологічної підготовки полягає в наступному:

- істотне збільшення кількості варіантів вирішення задач, що призводить до зростання затрат на обробку даних;
- відсутність показників пристосованості конструкції виробу для вирішення оптимізаційних задач;
- відсутність показників ефективності вирішення оптимізаційних задач.

Загальну схему комплексної технологічної підготовки представлено на рис. 4.2. Така схема є трудомісткою через істотне збільшення кількості варіантів вирішення задач технологічної підготовки і, відповідно, варіантів матеріалізації групи виробів. Зважаючи на практичний досвід, виконувати розрахунки з визначення технологічних параметрів матеріалізації групи виробів вдається за наступною кількістю варіантів: $n_5 = 10^6 \div 10^9$ (на прикладі виготовлення 5÷10 деталей в одному проекті матеріалізації). З метою зменшення кількості розрахованих варіантів запропоновано виконання попередньої оцінки конструкції виробу щодо доцільності виконання задач технологічної підготовки на основі аналізу тріангуляційної 3D-моделі.

Запропоновані методики та алгоритми оцінки на основі аналізу вихідної тріангуляційної 3D-моделі і похідної від неї воксельної моделі, представлені в розд. 3 і 5. У результаті на підставі отриманих показників пристосованості конструкції виробів для рішення планованих оптимізаційних задач приймається рішення про необхідність їх виконання або їх спрощеного рішення (мінімізації варіантів їх реалізації). Орієнтовно такий підхід дозволить мінімізувати кількість

Вихідні САД-моделі виробів



Рисунок 4.2 – Запропонована схема комплексного вирішення задач на етапі планування технологічної підготовки АМ-процесів

розглянутих варіантів до $n_5 = 10^2 \div 10^3$. Додаткове використання інструментів штучного інтелекту (методів машинного навчання) може дозволити істотно зменшити їхню кількість.

4.2 Методологічні основи комплексного вирішення задач технологічної підготовки

За аналогією з існуючими підходами до технологічної підготовки виробництва [230] необхідно створення елементної бази, що дозволяє реалізувати прийняту схему вирішення задач (рис. 4.2).

4.2.1 Загальні відомості про елементну базу

Елементна база технологічної підготовки матеріалізації виробів адитивними методами пошарової побудови являє собою сукупність методів аналізу вихідної тріангуляційної 3D-моделі та алгоритмів щодо вирішення оптимізаційних задач для визначення технологічних параметрів матеріалізації одного або групи виробів. При цьому повинна бути можливість збереження інформації за рішенням попередніх проектів матеріалізації з метою їх аналізу та виявлення ефективних підходів щодо вирішення задач технологічної підготовки для близьких за конструкцією раніше виготовлених виробів.

З урахуванням відомих схем технологічної підготовки АТ [229] запропонована схема комплексного вирішення задач технологічної підготовки, представленої на рис. 4.2. Дану схему доповнено аналізом вихідної 3D-моделі перед кожною оптимізаційною задачею з метою виявлення раціональних шляхів для технологічних рішень та можливостей застосування багатокритеріальної оптимізації при спільному їх вирішенні, а також визначення необхідних і достатніх умов для спільного вирішення оптимізаційних задач, які дозволять реалізувати комплексну технологічну підготовку АТ.

Необхідні умови для спільного автоматизованого вирішення оптимізаційних завдань:

- єдині критерії оптимізації для задач, що вирішуються спільно;
- адекватність отриманих розрахунковим шляхом раціональних значень

технологічних параметрів матеріалізації (відповідність експериментально визначених величин).

Достатні умови для спільногого вирішення оптимізаційних задач:

- використання інструментів аналізу машинного навчання для прискорення процесу виявлення раціональних варіантів вирішення задач;
- попередня оцінка придатності конструкції виробу на основі аналізу вихідної тріангуляційної 3D-моделі;
- створення комп'ютерної системи технологічної підготовки АМ-процесів, що дозволяє автоматизувати і систематизувати статистичний аналіз результатів розрахунків;
- використання евристичних алгоритмів пошуку та чисельних методів для прискорення процесу виявлення раціональних значень технологічних параметрів матеріалізації.

Повне забезпечення перерахованих умов дозволить отримати необхідну елементну базу для ефективної технологічної підготовки матеріалізації виробів адитивними методами. Ефективна технологічна підготовка повинна бути здатна призначати такі технологічні параметри, які з урахуванням конструктивних особливостей виробів дозволяють забезпечити задані вимоги щодо точності і якості поверхні при мінімальній витраті матеріалу та часу виготовлення.

4.2.2 Обґрунтування необхідності розробки комп'ютерної системи технологічної підготовки

Розроблену систему технологічної підготовки, як і будь-яку іншу автоматизовану систему, можна розглядати з чотирьох взаємопов'язаних сторін; структурної, інформаційної, функціональної та організаційної [188].

Розробка системи технологічної підготовки включає сукупність методів, алгоритмів, підпрограм для розв'язання ряду задач, об'єднаних з метою проектування технологічної підготовки АМ-процесів для одержання виробів зі складною геометрією [230].

Незважаючи на існування достатньої кількості програм для розробки технологічних процесів стосовно адитивних технологій, вони не є широко

застосовними. Огляд сучасних підходів щодо комп'ютерної підтримки конструкторської та технологічної підготовки виробництва представлено у роботі [96]). Область застосування алгоритмів і програм часто залишається досить вузькою [231].

Основною метою розробленої комп'ютерної системи є підвищення якості та скорочення термінів вирішення задач технологічної підготовки матеріалізації виробів адитивними методами. Потреба у зменшенні частки участі спеціаліста у вирішенні задач технологічної підготовки, поступове об'єднання їх у комплекс і системи проектування з використанням інструментів штучного інтелекту (зокрема машинного навчання) диктується сучасними тенденціями розвитку технологій [232, 233]. Комплексне рішення оптимізаційних задач приводить до необхідності розробки і створення вузькоспеціалізованої системи технологічної підготовки виробництва стосовно до адитивних методів виготовлення.

Процес відпрацювання конструкцій на технологічність при роботі з полігональною 3D-моделлю виробу в значній мірі цілком піддається формалізації (див. розд. 3) і, як наслідок, автоматизації.

Система технологічної підготовки повинна включати автоматизацію таких функцій, як розробка технологічних процесів, статистичний аналіз досліджуваних характеристик (геометричних показників 3D моделі та технічних параметрів) і пошук інформації.

4.2.3 Автоматизація розробки АМ-процесів

Проблема автоматизації аналізу вихідної 3D-моделі виробу і виконання оптимізаційних задач з визначення раціональних значень технологічних параметрів розроблюваного АМ-процесу полягає в наявності суттєвої трудомісткості і невизначеності взаємозв'язку між показниками точності, якості готового виробу та параметрами режимів виготовлення, станом вихідного матеріалу. Особливо ускладняється виконання задач зі збільшенням складності геометрії одержаного виробу. Необхідно передбачати виконання процедур опрацювання конструкції щодо її технологічності з урахуванням особливостей адитивних методів виготовлення.

Методологія включає в себе загальнонаукові та спеціальні методи дослідження [234, 235]. В даному випадку розроблено методологію технологічної підготовки матеріалізації складних виробів адитивними методами — систему методів отримання інформації з вихідної конструкції виробу (заданої полігональної 3D-моделі), її аналізу, використання при рішенні оптимізаційних задач і можливості реалізації комплексного підходу у вирішенні оптимізаційних задач.

Запропоновано нову концепцію технологічної підготовки адитивного виробництва складних виробів, в рамках якої потрібно вирішувати спільно основні задачі: структурна оборотна декомпозиція (розд. 4.5), раціональна орієнтація (розд. 4.6), розміщення виробу в робочому просторі пошарової побудови (розд. 4.7, 4.8) і формування набору шарів (розд. 4.9) на базі методології статистичного аналізу полігональної (розд. 5.9), воксельної (розд. 5.6) та пошарової (розд. 5.8) 3D-моделі виробу.

Статистичні методи аналізу даних воксельної і пошарової моделей виробу застосовуються для отримання й обґрунтування раціональних технологічних параметрів та виявлення впливу характеристик геометрії виробу заданої полігональною (вихідною тріангуляційною) 3D-моделлю. Потреба у використанні статистичних методів підвищується із збільшенням складності геометрії форм конструкції виробу, що має деяку неоднорідність властивостей по координатним осям.

В ході статистичного дослідження для опису даних застосовують як детерміновані, так і ймовірнісні методи. За допомогою детермінованих методів можна проаналізувати тільки ті дані, які є в розпорядженні дослідника. Наприклад, таблиці, заповнені даними, що отримано при аналізі тріангуляційної 3D-моделі виробу. Перенести отримані результати на більш широку сукупність виробів, використовувати їх для передбачення і забезпечення раціонального виконання технологічної підготовки АМ-процесів можна лише на основі ймовірнісних підходів у дослідженні [236].

Статистичний аналіз даних, як правило, включає в себе цілий ряд процедур та алгоритмів, що виконуються послідовно, паралельно або за більш складною схемою. Дослідження в розробленій системі слід виконувати з урахуванням загальноприйнятної послідовності за наступними етапами [237]:

- планування статистичного дослідження;
- організація збору вихідних статистичних даних (зберігання у файли XLS, CSV і TSV-форматів);
- безпосередній збір даних (з контролем якості збору та відбраковуванням помилкових даних з міркувань забезпечення реалістичності АМ-процесів);
- первинний опис даних (розрахунок різних вибіркових характеристик, функцій розподілу, непараметричних гіпотез),
- більш поглиблене вивчення, тобто застосування різних алгоритмів багатовимірного статистичного аналізу, алгоритмів діагностики та побудови класифікацій;
- перевірка стійкості отриманих оцінок і висновків щодо допустимих відхилень вихідних даних;
- застосування отриманих статистичних результатів (для визначення раціонального режиму технологічного процесу);
- складання підсумкових звітів.

У поширених математичних пакетах програм відсутня більшість сучасних статистичних методів, візуального аналізу багатовимірних даних, а також залишається невирішеною проблема автоматизації дослідження [237]. Тому слід в розробленій системі впровадити інструменти статистичного аналізу. Такий підхід дозволить прискорити аналіз даних завдяки його впровадженню в своє середовище та відсутності необхідності переведення даних (операцій експорту та імпорту) з властивими їм проблемами у появі помилок. У тому числі це дозволяє краще розуміти алгоритми і результати аналізу та науково обґрунтовано підходити до виявлення зв'язків між рядами даних.

Можливість комплексного вирішення задач заснована на загальному комплексі показників оцінки геометричної складності і технологічності виробу

на базі аналізу вихідної тріангуляційної 3D-моделі та критеріїв оптимізації при визначенні раціональних параметрів АМ-процесів. В якості таких загальних критеріїв оптимізації обрано наступні:

- відхилення від правильної форми, що визначаються на основі пошарового аналізу;
- відносний використаний об'єм робочого простору пошарової побудови, який визначається на основі аналізу воксельної 3D-моделі виробу.

З метою забезпечення науково обґрунтованого вибору раціонального варіанту виконання АМ-процесу необхідно виконання повного перебору можливих комбінацій технологічних параметрів. Для зменшення кількості розглянутих комбінацій параметрів і, відповідно, часу перебору для вирішення оптимізаційних задач, використовується еволюційне програмування, а зокрема генетичний алгоритм (розд. 4.3).

Теоретичне дослідження і практична реалізація розроблених принципів, що забезпечують підвищення ефективності матеріалізації складних виробів адитивними технологіями, представлені в розд. 5 і 6 відповідно.

У наступних підрозділах представлено розробки основ методології комплексної технологічної підготовки адитивного виготовлення складних виробів з окремої задачі окремо.

4.3 Алгоритмічне забезпечення комплексної технологічної підготовки

У процесі технологічної підготовки до матеріалізації складних виробів адитивними методами вирішується ряд оптимізаційних задач. Оптимізаційні задачі - це задачі, в яких потрібно знайти найкраще (оптимальне з безлічі альтернатив на основі обраного критерію) рішення, що передбачає вибір стратегії матеріалізації і значень технологічних параметрів.

Особливості вирішення оптимізаційних задач з вибору найкращого рішення або раціональних значень технологічних параметрів матеріалізації [238]:

- завдання (визначення) вихідної множини (простору рішень M)

альтернативних варіантів рішень;

- завдання обмежень, які дозволяють виділити в просторі рішень M деяку підмножину рішень M' , які задовольняють заданим обмеженням D ;

- задаються принцип порівняння за допомогою критерію оптимальності, тобто цільової функції $f(x) \rightarrow \max$ або $f(x) \rightarrow \min$ і керуючі параметри, що визначають значення $f(x)$.

У дослідженні технологічної підготовки слід враховувати, що оптимізаційні задачі є багатовимірними (керуючих параметрів $N_{par} > 1$). При цьому вибір оптимального рішення в більшості випадків виконувався з допустимої множини, тобто з завданням обмежень на допустиме значення технологічних параметрів.

При моделюванні оптимізаційних задач задавалися наступними умовами закінчення пошуку оптимального рішення:

- несуттєва зміна критерію оптимальності за цикл розрахунків;
- відсутність змін величини критерію оптимальності за заданими змінними величинами керуючих параметрів.

4.3.1 Вибір алгоритмічної бази

Алгоритмічне забезпечення рішення оптимізаційних задач має важливе значення, так як визначає час, витрачений на їх вирішення, якість їх рішення (з можливістю врахування безлічі умов реалізації процесу пошарової побудови) і точність визначення раціональних значень параметрів.

На сьогодні одними з найбільш вживаних алгоритмів при вирішенні задач, побудованих на основі великих даних, є еволюційні алгоритми. Еволюційні алгоритми – це напрямок в штучному інтелекті, що використовує моделі процесів природного відбору [239-242].

Види еволюційних алгоритмів адаптивного пошукового механізму [240], які слід використовувати у дослідженні АМ-процесів:

- генетичні алгоритми — це евристичний алгоритм пошуку, використовуваний для рішення оптимізаційних задач і створення моделей шляхом випадкового підбору, комбінування і варіації найкращих значень

досліджуваних ознак [239];

- програмування з експресією генів є аналогічним еволюційному програмуванню з використанням деревовидних структур [241];
- диференціальна еволюція — метод еволюційного моделювання, що відноситься до класу стохастичних алгоритмів багатовимірної оптимізації [242].

Еволюційні алгоритми використовуються при комбінаторній оптимізації, що включає рішення задач класу складності *NP* (*Nondeterministic polynomial*). У даній роботі застосовується при вирішенні технологічної оптимізаційної задачі знаходження раціонального розміщення виробів в робочому просторі пошарової побудови АМ-установки. Перспективність використання даних алгоритмів полягає у можливості реалізації комплексного вирішення оптимізаційних задач технологічної підготовки АМ-процесів.

Для вирішення інженерних задач з великим числом змінних, як правило, використовують статистичні методи оптимізації [238]. У роботі використовуються метод випадкового пошуку (метод Монте-Карло) та генетичні алгоритми як такі, що є найменш чутливими до локальних оптимумів.

4.3.2 Метод Монте-Карло

Метод Монте-Карло є основним методом випадкового пошуку. Даний метод є досить простим в реалізації. Коротко по його перевазі: при пошуку екстремуму функції $f(x)$ в заданій області допустимих параметрів $x \in [x_{min}, x_{max}]$ задається точність його визначення (e – допустиме відхилення від оптимального значення). При цьому нехай допустима область по одному з параметрів $\Delta_x = x_{max} - x_{min}$. В методі Монте-Карло виробляється псевдовипадковий вектор параметрів з рівномірним розподілом. Тоді ймовірність непотрапляння в область екстремуму за кожен крок – $p_h = 1 - e/\Delta$. Відповідно ймовірність визначення оптимального значення функції $f(x)$ за n кроків $p_o = 1 - p_h^n$ [243].

4.3.3 Генетичний алгоритм

В даний час використовується нова парадигма рішень оптимізаційних задач на основі генетичних алгоритмів [238].

Генетичний алгоритм являє собою адаптивний пошуковий метод оптимізації, заснований на концепціях природного відбору (моделі біологічної еволюції) та генетики [238]. У 1975 р. Д. Холланд [244] запропонував схему генетичного алгоритму. Ці роботи лягли в основу головних напрямків розробки еволюційних алгоритмів. Простий генетичний алгоритм був вперше описаний Гольдбергом на основі робіт Холланда [238]. У цьому алгоритмі змінні, що характеризують рішення, представлені у вигляді ген в хромосомі. Алгоритм оперує кінцевою безліччю рішень (популяцією) - генерує нові рішення як різні комбінації частин рішень популяції, використовуючи такі оператори, як відбір, рекомбінація (кросинговер) і мутація.

Переваги використання генетичних алгоритмів [245]:

- немає потреби в інформації щодо поведінки досліджуваної функції взаємозв'язку технологічних параметрів та характеристик;
- не є суттєвим вплив розривів на поверхні відповіді досліджуваної функції на ефективність вирішення оптимізаційної задачі;
- висока стійкість до потрапляння в локальні оптимальні області значень;
- хороші результати при вирішенні досить масштабних проблем оптимізації;
- застосовність до широкого класу задач;
- проста програмна реалізація;
- підходять до задач зі змінним середовищем.

Також є наявність недоліків у використанні генетичних алгоритмів:

- проблематично точно визначити глобальне оптимальне значення;
- досить тривалий час розрахунків, як наслідок зниження ефективності;
- проблема при пошуку безлічі рішень задачі (при безлічі екстремумів можливе виникнення великої кількості атракторів);
- багатовимірні дані потребують виконання кодування вихідних даних і рішення.

Найбільш поширене використання генетичного алгоритму при вирішенні трьох класів задач:

- швидка локалізація одного оптимального значення,
- визначення декількох (або всіх) глобальних екстремумів,
- опис досліджуваної функції з виділенням локальних і глобальних екстремумів.

Стосовно АМ-процесів найбільший інтерес представляє використання генетичного алгоритму при вирішенні задачі розміщення виробів в робочому просторі пошарової побудови.

У роботі використано простий (має також назву класичний, елементарний або основний [240]) генетичний алгоритм, механізм якого відноситься до нескладних в програмній реалізації. Даний алгоритм включає операції репродукції, кросинговеру і мутації. Схема використаного в роботі алгоритму представлена на рис. 4.3.

У представлений схемі на рис. 4.3 включено основні етапи генетичного алгоритму:

- формування початкової популяції з n хромосом;
- визначення придатності хромосом;
- вибір пар хромосом - батьків із заданим методом селекції;
- виконання кросинговеру двох батьків з імовірністю p_c з отриманням двох нащадків;
- мутація нащадків з ймовірністю p_m ;
- повтор кроків вибору пар, кросинговеру та мутації до отримання згенерованого нового покоління популяції, що містить n хромосом.
- повторення кроків, починаючи з оцінки придатності до забезпечення критерію закінчення процесу.

В якості критерію закінчення процесу розрахунку задається гранична кількість поколінь або сходження популяції. Сходженням називається такий стан популяції, коли популяції близькі за величиною цільової функції і знаходяться в області деякого екстремуму. У такій ситуації кросинговер практично не змінює популяції. Вихід з області локального екстремуму забезпечувався за рахунок мутації особини її схильності відпадати через меншу пристосованість.

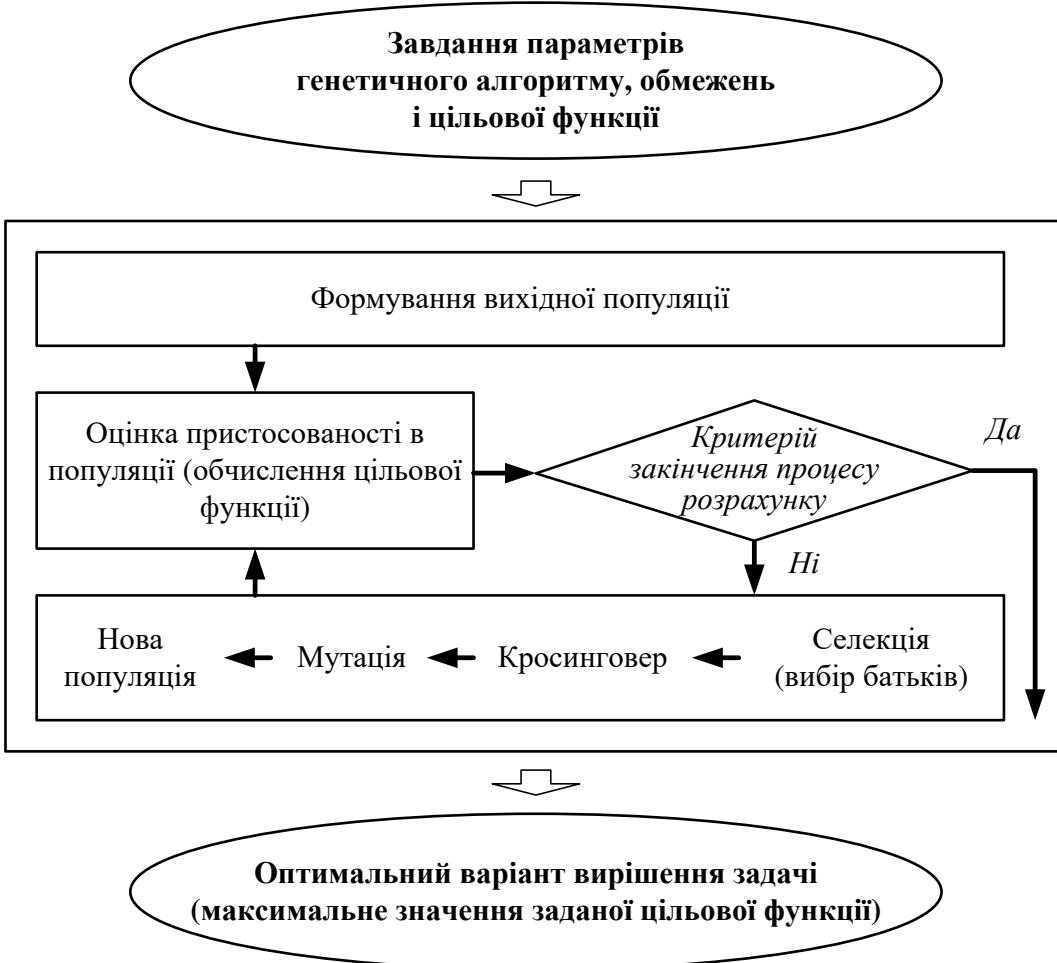


Рисунок 4.3 - Схема генетичного алгоритму, що використовується в системі технологічної підготовки

Використовувались базові форми операторів (кросинговер, мутація, вибір батьків і селекція) у розробленій системі технологічної підготовки. Відкритість коду дозволяє виконувати їх модернізацію, що веде до отримання генетичного алгоритму, придатного для ефективного рішення конкретної задачі.

Для застосування алгоритму важливим є правильно вибрати цільову функцію адекватну задачі, і вона не повинна мати на поверхні функції великих плоских ділянок, так як тоді буде низька ефективність розрахунків. Пояснюється це тим, що більшість осіб у популяції при розходженні в генотипі не мають відмінностей фенотипу, тобто незважаючи на те, що особи різні, вони мають однакову придатність (величину цільової функції), а відповідно алгоритм не може вибрати найкраще рішення [245].

Однією з труднощів вирішення оптимізаційних задач є передчасна збіжність при виконанні алгоритмів, що особливо характерно при великій кількості локальних оптимумів. Модифікація відомих методів селекції дозволяє в деяких випадках вирішувати проблему попередньої збіжності [238]. Тому представляє інтерес застосовувати комбіновані методи селекції з використанням попередніх знань (попередніх результатів) для підвищення ефективності використання генетичного алгоритму.

У роботі застосовано одноточковий кросинговер, в якому дві хромосоми, що схрещуються, розрізаються один раз в обраній точці та проводиться обмін отриманими частинами. Однак використання більшої кількості точок кросинговеру може збільшити область значень цільової функції, а відповідно дозволить виконувати дослідження більш повно і докладно [238, 240]. Така обставина відкриває можливості для дослідження впливу виду кросинговеру на результативність вирішення оптимізаційної задачі раціонального розміщення виробів у робочому просторі пошарової побудови.

Немаловажним є коректне виконання оператора селекції (вибору батьків). Існує кілька підходів до вибору батьківської пари. У даному випадку обрано панміксію як простої в реалізації. Цей підхід передбачає випадковий вибір батьківської пари з поточної популяції. В такому випадку особиною може стати будь-який член популяції з рівною ймовірністю. Незважаючи на простоту, такий підхід є універсальним для вирішення різних класів задач [238, 245]. При цьому є недолік у зниженні ефективності алгоритму зі збільшенням розміру популяції. Також представляє інтерес розглянути селективний спосіб вибору осіб у батьківську пару. Даний спосіб полягає в тому, що "батьками" стають особи, значення пристосованості яких більше середньоарифметичного значення пристосованості (величини цільової функції) по популяції, при рівній ймовірності таких кандидатів скласти шлюбну пару [238].

Селективний спосіб вибору забезпечує більш швидку збіжність алгоритму. Але внаслідок швидкої збіжності такий спосіб не підходить при необхідності визначення декількох екстремумів, оскільки, як правило, передчасно буде

сходиться до одного з рішень (визначення квазіоптимального варіанту). Цей недолік можна мінімізувати використанням механізму відбору, пристосованого до конкретної задачі [238, 240, 245].

Основні принципи, які були забезпечені і ефективно реалізовані при використанні генетичного алгоритму:

- цілісності (значення цільової функції не визначається як сума цільових функцій часткових рішень);
- додатковості (використовувати несумісні та взаємодоповнюючі моделі еволюції та генетичних операторів);
- відповідності (опис вихідної задачі має відповідати наявній про неї інформації);
- різноманітності шляхів розвитку (багатоваріантна реалізація алгоритмів);
- єдності і протилежності порядку та хаосу (хаос області допустимих рішень обов'язково міститься порядок в процесі визначення рішення);
- сумісності та роздільності (процес пошуку рішення носить поступальний, пульсуючий або комбінований характер);
- ієрархічності (алгоритми можуть надбудовуватися зверху вниз і знизу вгору);
- «Бритви Оккама» (надмірно не ускладнювати архітектуру алгоритмів);
- спонтанного виникнення (випадкове генерування набору альтернативних рішень);
- гомеостазу (отримане альтернативне рішення не повинно виходити з області допустимих).

Основна перевага у використанні генетичних алгоритмів при вирішенні оптимізаційних задач (розд. 4, 5) проявилається в зменшенні об'єму і часу обчислень. При цьому вдалося спростити моделювання цільової функції і скоротити число потенційних помилок при формулюванні задачі.

4.3.4 Математичний опис рішення оптимізаційної задачі з використанням генетичного алгоритму

У даному підрозділі дається математична постановка оптимізаційної задачі

при використанні генетичного алгоритму на основі існуючих напрацювань [245, 246] в цьому напрямку.

Для цільової функції $f_t(x)$ у просторі пошуку X потрібно знайти $x' = \arg \max_{x \in X} f_t(x)$.

Послідовність виконання алгоритму:

- генерується (рівномірний закон розподілу величин технологічних параметрів набору пробних рішень $P_t(p_1, p_2 \dots p_n)$, $p_i \in X$ (n - розмір популяції)), де єдиний критерій - достатня різноманітність осіб;

- оцінка поточного покоління $F_t = (f_1, f_2 \dots f_n)$, $f_i = f(p_i)$;

- закінчення розрахунку, якщо виконується критерій зупинки (в іншому випадку виконується перехід на наступну дію);

- генерація нового покоління за допомогою операторів селекції S , скрещування C і мутацій M : $P_{t+1} = M \cdot C \cdot S(p_i, f_i)$ (рекомендується відкидати "клони") та перехід до пункту оцінки.

У процесі селекції відбирають тільки кілька кращих пробних рішень, а інші далі не використовуються. Скрещування за місце пари рішень створює нову пару, елементи якої перемішані за заданою процедурою. Мутація випадковим чином змінює вибрану компоненту пробного рішення.

Оцінка пристосованості реалізується в дві стадії:

- оцінка $F_t = (f_1, f_2 \dots f_n)$;

- додаткові перетворення (нормування) до виду $F_{t,n} = (f_i - f_{\min}) / (f_{\max} - f_{\min})$, де f_{\max} і f_{\min} - максимальне і мінімальне значення цільової функції в поточній популяції відповідно).

Оператор скрещування працює з двома кращими особами. Результатом є дві особи з компонентами, взятими від їхніх батьків. Мета цього оператора - поширення хороших генів у популяції і стягування щільності популяції до оптимальних областей у припущені, що "нас багато там, де добре".

У одноточковому варіанті результатом схрещування батьків $p_i^k = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, $p_j^k = \{b_1, b_2, \dots, b_n\} \in P^k$ у k -ої популяції стануть два елементи популяції $k+1$ такі, що $p_i^{k+1} = \{a_1, a_2, \dots, a_c b_{c+1}, b_{c+2}, \dots, b_n\}$, $p_j^{k+1} = \{b_1, b_2, \dots, b_c a_{c+1}, a_{c+2}, \dots, a_n\} \in P^{k+1}$, де точка C^k вибирається випадково. В двоточковому варіанті, відповідно, випадково вибирають дві точки перетину [238]. При необхідності можливо розширити цю конструкцію до n точок.

Оператор мутацій змінює довільне число елементів в особі на інші довільні. Даний оператор дозволяє не залишатися в локальних екстремумах.

Можливі критерії зупинення розрахунків за визначенням оптимальних значень [238-240, 245]:

- знаходження глобального оптимуму;
- виходом на «плато» (зі зміною поколінь не змінюється значення цільової функції);
- обмеження заданим числом поколінь;
- обмеження заданим часом на розрахунки;
- обмеження значення цільової функції (забезпечення заданих вимог щодо конкретного АМ-процесу).

4.3.5 Рекомендовані параметри генетичного алгоритму

Вибір параметрів генетичного алгоритму визначається конкретною задачею, що вирішується. Як правило, ймовірність кросинговеру вибирається досить високою $p_c = 80 \div 95 \%$. Існують рекомендації щодо зменшення ймовірності кросинговеру до $p_c = 60 \%$. Таке значення в деяких випадках дає найкращий результат. Ймовірність мутації рекомендується задавати в межах $p_m = 0,5 \div 1,0 \%$.

Як показали розрахунки (у розд. 5) збільшення розміру популяції не призводить до зменшення часу знаходження оптимальних величин. Раціональний розмір популяції $X = \{x_i, i = 1, 2, \dots, n\} — N_p = 20 \div 50$ осіб. З методичних міркувань в ряді випадків розмір популяції збільшувався до $N_p = 200$

осіб. Дослідження показують, що оптимальна величина N_p залежить від заданого розміру гена (визначається кількістю керованих параметрів).

Перевірка ефективності роботи генетичного алгоритму з рекомендованими параметрами виконувалася з цілого ряду функцій з відомими глобальними (мінімальними або максимальними) екстремумами.

4.4 Попередні етапи технологічної підготовки

Першими задачами технологічної підготовки 3D-моделі до матеріалізації адитивними технологіями є відпрацювання конструкції на технологічність і перевірку коректності вихідної тріангуляційної 3D-моделі виробу.

Відпрацювання конструкції на технологічність виконується з урахуванням особливостей адитивних методів пошарового виготовлення. З метою забезпечення можливості комплексного вирішення оптимізаційних задач у розд. 3 запропоновано низку показників технологічності та прогнозованої ефективності вирішення основних технологічних задач. Запропонований ряд показників дозволяє мінімізувати тимчасові ресурси, що витрачаються на технологічну підготовку за рахунок відкидання тих задач, рішення яких буде малоефективним.

Перевірка якості та коректності тріангуляційної 3D-моделі виконувалася в програмному забезпеченні, розробленому раніше на кафедрі "Інтегровані технології машинобудування" НТУ "ХПІ" [91].

4.5 Структурна оборотна декомпозиція та дослідження її впливу на ефективність розміщення 3D-моделей виробів в робочому просторі установки

Однією з основних задач технологічної підготовки адитивного виробництва є структурна оборотна декомпозиція виробу [247]. Як правило, структурну декомпозицію використовують для великогабаритних виробів, розміри яких перевищують розміри платформи установки [225]. Рішення даної задачі дозволяє досить істотно зменшити час виготовлення і збільшити питомий використовуваний об'єм робочого простору АМ-установки [73].

Оптимізаційна задача по застосуванню декомпозиції виробу є досить трудомісткою і багатоваріантною. Однією з причин цього є геометрична складність форм виробів, одержаних АМ-процесами. Внаслідок трудомісткості задачі є актуальним для обґрунтованого використання декомпозиції виконання попередньої оцінки прогнозованої її ефективності.

Структурна декомпозиція виробу, як правило, є першою задачею, що виконується при технологічній підготовці, так як визначає геометричні та технологічні обмеження для наступних задач (послідовність розв'язуваних задач представлено на рис. 4.1, 4.2).

Робота [226] є однією з перших, що розв'язує задачу раціонального використання робочого простору шляхом декомпозиції виробів. При цьому тріангуляційна 3D-модель перетворювалася у растроїй (воксельний) вид.

Декомпозицію виробу виконують різними способами розсічення 3D-моделі. В роботах [73, 224, 248-252] розсічення 3D-моделі здійснюється площинами за обраним критерієм: час формоутворення, площа контакту з структурами підтримки і/або об'єм підтримуючих структур.

У роботах [119, 120, 249, 250] представлено методи досить поширеного виконання декомпозиції з утворенням частин виробу з мінімальною складністю геометричної форми поверхонь. Такі методи побудовані на основі кластерного аналізу тріангуляційної моделі [119, 120] або поєднання кластерного і спектрального аналізу за набором морфометричних характеристик [249]. В роботі [250] розбиття на частини виробу здійснювалося на основі оцінки кривизни поверхні за орієнтацією ребер тріангуляційної моделі.

Наповнення робочого простору установки у формі паралелепіпеда буде найбільшим при розміщенні частин виробу такої ж форми. Тому в ряді робіт [118, 119, 121, 251] декомпозицію виробу виконано з використанням паралелепіпедів або призм із заданими розмірами. Але такий підхід має обмеження в застосуванні для тонкостінних виробів [251].

Наприклад, в роботі [118] декомпозицію виконано на основі структурного аналізу. В якості критерію оптимізації обрані трудомісткість складання частин в

цілий виріб і питомий використовуваний об'єм (займаний виробами) робочого простору. Другий критерій є побічним, але є основним в роботі [121].

В роботах [225, 247, 251] завдання розміщення виробу в робочому просторі вирішується з використанням генетичного алгоритму. В роботах [225, 247] представлено спільне рішення оптимізаційних задач орієнтації та розміщення виробу. В роботі [225] для спільного вирішення задач використано такі критерії оптимізації як висота побудови і співвідношення габаритних розмірів виробу по осіах X і Y .

На етапі прийняття рішення про застосування декомпозиції виробу і його розміщення в робочому просторі є важливим попередня оцінка ефективності їх реалізації [252]. Необхідність оцінки ефективності диктується досить великою трудомісткістю виконання цих задач. Основна причина підвищеної трудомісткості полягає в безлічі критеріїв і необхідності перебору великої кількості варіантів декомпозиції для виробів зі складною геометрією поверхонь та їх розміщення. Незважаючи на достатню кількість публікацій щодо декомпозиції виробів, задача попередньої оцінки її ефективності на основі аналізу конструкції залишається нерозглянутою. Притому, що така оцінка необхідна для визначення рівня технологічності і пристосованості конструкції для ефективної реалізації декомпозиції виробу стосовно до адитивних технологій. Міжнародний стандарт ISO/ASTM 52910:2017 [253] та існуюча тенденція до спільного вирішення задач технологічної підготовки [252] вказують на актуальність дослідження можливостей попередньої оцінки їх ефективності.

Зроблено припущення, що виявлення показників просторового розподілу елементарних об'ємів виробу дозволить виконувати оцінку прогнозованої ефективності його декомпозиції. Використання вокセルної моделі надає можливості для аналізу просторового розподілу елементарних об'ємів (вокселей матеріалу) виробу. Тому розглянуто наукову гіпотезу про те, що статистичний аналіз розподілу матеріалу виробу (елементів вокельної моделі) дозволить виконувати оцінку прогнозованої ефективності застосування структурної оборотної декомпозиції для раціонального використання робочого простору

установки.

Для обґрунтування запропонованої гіпотези необхідно вирішення наступних задач:

- реалізування переходу від вихідної тріангуляційної 3D-моделі виробу до воксельної моделі (розд. 5);
 - забезпечення виконання статистичного аналізу розподілу елементів воксельної 3D-моделі по осях X , Y , Z і підпросторах (що належать робочому простору установки) (розд. 5);
 - виконання аналізу впливу числа частин виробу, одержаних у результаті його декомпозиції (реалізується розділення 3D-моделі паралелепіпедами), на використовуемий питомий об'єм робочого простору.
- визначення показників, що характеризують розподіл матеріалу виробу і дозволяють оцінювати ефективність застосування декомпозиції.

4.5.1 Дослідження впливу числа частин виробу на використовуемий питомий об'єм робочого простору при їх розміщенні

Враховуючи результати робіт [73, 121, 251], раціональне використання структурної оборотної декомпозиції виробу можливе за таких умов:

- при максимізації питомого використаного об'єму робочого простору установки K_V ;
- попередньої орієнтації виробу таким чином, щоб нормалі пласких поверхонь (з найбільшою площею) були колінеарними координатній осі Z ;
- мінімізації загальної кількості частин розбиття N_D з метою забезпечення менших витрат при їх складанні в цілий виріб;
- завдання розмірів частин розбиття l_x , l_y , l_z , кратних заданим величинам m_x , m_y , m_z .

Величини m_x , m_y , m_z приймаються з урахуванням умов забезпечення найбільш раціонального розміщення частин виробу на робочій платформі

установки, тобто з максимальним K_V . Наприклад, визначення m_x , m_y , m_z пропонується, виходячи з наступних залежностей:

$$L_X \approx n_x \cdot m_x + (n_x + 1) \cdot l_{\min}, \quad n_x \in \mathbb{N}; \quad (4.1)$$

$$L_Y \approx n_y \cdot m_y + (n_y + 1) \cdot l_{\min}, \quad n_y \in \mathbb{N}; \quad (4.2)$$

$$H_Z \approx n_z \cdot m_z + (n_z + 1) \cdot l_{\min}, \quad n_z \in \mathbb{N}; \quad (4.3)$$

де L_X , L_Y , H_Z – габаритні розміри робочої платформи обраної установки і задана (прогнозована) висота завантаження виробів; l_{\min} – величина мінімально допустимої відстані між виробами і від них до країв платформи.

При використанні рівнянь (4.1)–(4.3) необхідно підбирати мінімальні значення n_x , n_y , n_z , але достатні для декомпозиції виробу на раціональне число частин.

Для ефективної реалізації декомпозиції виробу необхідна кількісна оцінка конструкції виробу. Як правило, для оцінки конструкції використовують відносні показники (рівень технологічності), які приводять до єдиного діапазону значень $K \in [0, 1]$ [68, 69]. В якості найбільш представницької дослідженої ознаки тріангуляційної 3D-моделі з урахуванням робіт [73, 118, 211], використовується відносний зйоманий об'єм по відношенню до описуючого паралелепіпеду:

$$K_V = V_{Part} / V_{Box}, \quad (4.4)$$

де V_{Part} – об'єм виробу або його структурної частини, V_{Box} – об'єм паралелепіпеду, що описує виріб за його габаритами або об'єм робочого простору.

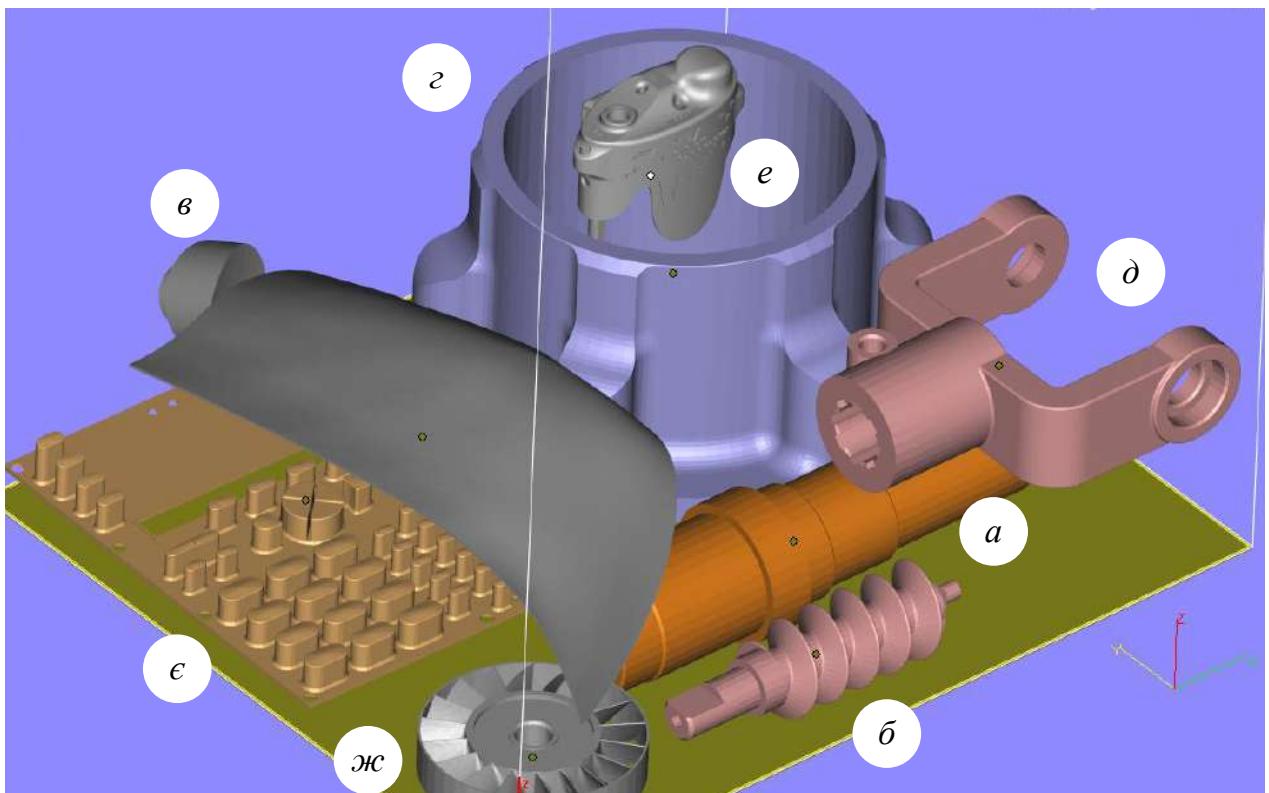
Розміри паралелепіпеда, що описує виріб або його структурну частину, для визначення V_{Box} необхідно використовувати наступні:

- при визначенні питомої використованого об'єму робочого простору за розмірами платформи L_X , L_Y і висоті завантаження H_Z ;
- при оцінці технологічності конструкції за габаритними розмірами виробу.

Виріб у формі паралелепіпеда з розмірами, відповідними розмірам робочого простору обраної установки, буде мати коефіцієнт $K_V = 1$, тобто такий

виріб буде найбільш технологічним за конструкцією для виконання задачі раціонального розміщення. За умови розбіжності розмірів паралелепіпеда з розмірами робочого простору такий виріб буде мати найбільшу технологічність для завдання структурної оборотної декомпозиції.

Раціональне використання декомпозиції можливе при відомій залежності питомого займаного об'єму робочого простору K_V від кількості N_D частин розбиття виробу. Але чіткої функціональної залежності не може бути через істотний вплив на неї конструкції виробу. Тому виконувалося дослідження за виявленням особливостей залежності $K_V = f(N_D)$ на прикладі невеликого ряду 3D-моделей промислових виробів представлених на рис. 4.4. Результати дослідження наведені в табл. 4.1.



*a – вал; б - шнек; в - лопать; г - корпус; д - карданий вал;
е – кришка; ж – панель; жс – вентилятор*

Рисунок 4.4 - Візуалізація розміщень виробів в робочому просторі адитивної установки

Завдання розміщення виробів та їх частин в робочому просторі установки виконувалася в системі Magics. Розміри робочої платформи вибиралися ($L_X = 380$ мм, $L_Y = 330$ мм) відповідними установці SLS Vanguard Si2 (вир-ва

Таблиця 4.1 – Вплив кількості частин виробу N_D на питомий використаний об'єм K_V і висоту H_V робочого простору установки SLS Vanguard Si2

Модель виробу (розміри, мм)	N_D , шт.	H_V , мм	$K_V, \%$	Модель виробу (розміри, мм)	N_D , шт.	H_V , мм	$K_V, \%$
Вал (64×64×138), 10 шт.	1	105,0	28,68	Шнек (40×40×144), 10 шт.	1	42,5	12,27
	2	85,0	35,58		2	32,5	16,11
	4	82,5	36,66		4	30,0	17,45
	8	90,0	33,61		8	37,5	13,96
	16	92,5	32,70		16	37,5	13,96
Лопать (152×139×262), 10 шт.	1	204,4	10,00	Карданний вал (148×50×124), 10 шт.	1	100,0	17,15
	2	185,0	11,05		2	110,0	15,60
	4	150,0	13,63		4	85,0	20,19
	8	132,5	15,73		8	65,0	26,40
	13	127,5	16,04		12	62,5	27,45
	25	140,0	14,61		16	65,0	26,40
Корпус (210×210×125), 5 шт.	1	452,5	7,96	Кришка (84×101×43), 10 шт.	1	43,2	6,23
	2	257,5	13,82		2	36,6	7,36
	4	227,5	15,55		4	34,1	7,90
	8	192,5	18,35		14	28,5	9,45
	16	182,5	19,33		22	35,0	7,70
Панель (152×196×20), 10 шт.	1	75,0	8,43	Вентилятор (26×92×92), 40 шт.	1	116,0	9,91
	2	70,0	9,06		2	92,5	12,50
	4	65,0	9,76		4	100,0	11,56
	8	65,0	9,76		8	130,0	8,89

Таблиця 4.2 – Результати аналізу розподілу вокселей матеріалу виробу по підпросторах

Модель виробу (розміри, мм)	Кількість підпросторів U_i				$\frac{N_{V0} + N_{V0.5}}{N_p}$
	N_p , шт.	N_{V0} , шт. (N_{V0}/N_p , %)	N_{V1} , шт. (N_{V1}/N_p , %)	$N_{V0.5}$, шт. ($N_{V0.5}/N_p$, %)	
Вал (64×64×138)	3^3	0	1 (3,7 %)	12 (44,4 %)	0,44
	4^3	4 (6,3 %)	8 (12,5 %)	32 (50 %)	0,56
	5^3	11 (8,8 %)	18 (14,4 %)	66 (52,8 %)	0,62
	10^3	310 (31 %)	311 (31,1 %)	539 (53,9 %)	0,85
Шнек (40×40×144)	3^3	0	1 (3,7 %)	3 (11,1 %)	0,11
	4^3	12 (18,8 %)	0	14 (21,9 %)	0,41
	5^3	17 (13,6 %)	3 (2,4 %)	30 (24 %)	0,38
	10^3	333 (33,3 %)	90 (9,0 %)	245 (24,5 %)	0,58
Лопать (152×139×262)	3^3	5 (18,5 %)	0	0	0,19
	4^3	20 (31,3 %)	0	0	0,31
	5^3	54 (43,2 %)	0	5 (4 %)	0,47
	10^3	682 (68,2 %)	0	65 (6,5 %)	0,75
Корпус (210×210×125)	3^3	3 (11,1 %)	0	0	0,11
	4^3	0	0	0	0,00
	5^3	37 (29,6 %)	0	4 (3,2 %)	0,33
	10^3	536 (53,6 %)	0	152 (15,2 %)	0,69
Карданний вал (148×50×124)	3^3	3 (11,1 %)	0	2 (7,4 %)	0,19
	4^3	20 (31,3 %)	0	2 (3,1 %)	0,34
	5^3	43 (34,4 %)	0	22 (17,6 %)	0,52
	10^3	532 (53,2 %)	8 (0,8 %)	212 (21,2 %)	0,74
Кришка (84×101×43)	3^3	5 (18,5 %)	0	0	0,19
	4^3	18 (28,1 %)	0	0	0,28
	5^3	43 (34,4 %)	0	0	0,34
	10^3	636 (63,6 %)	0	48 (4,8 %)	0,68
Панель (152×196×20)	3^3	2 (7,4 %)	0	0	0,07
	4^3	12 (18,8 %)	0	0	0,19
	5^3	36 (28,8 %)	0	0	0,29
	10^3	493 (49,3 %)	0	15 (1,5 %)	0,51
Вентилятор (26×92×92)	3^3	0	0	0	0,00
	4^3	12 (18,8 %)	0	4 (6,3 %)	0,25
	5^3	20 (16 %)	0	6 (4,8 %)	0,21
	10^3	348 (34,8 %)	0	89 (8,9 %)	0,44

3D Systems). Виконувалося одноразове завантаження 5÷40 виробів одного найменування в залежності від наповненості робочого простору. Орієнтація виробу не бралася до уваги (дискретність повороту навколо координатних осей задавалася $\Delta\phi = 90^\circ$). Мінімальна відстань між виробами і до кордонів платформи задавалося $l_{min} = 5$ мм.

З методичних міркувань для дослідження було взято 3D-моделі валу і карданного валу, які не належать до виробів, рекомендованих до виготовлення адитивними технологіями. Показники K_V для цих виробів були отримані найбільшими. Конструкції панелі та вентилятора виявилися найменш придатними для ефективного застосування декомпозиції.

За результатами дослідження виявлено, що кількість частин N_D слід обмежувати у зв'язку зі збільшенням сумарної площин частин. Через наявність мінімальної відстані між частинами виробів збільшення їх площин призводить до збільшення об'єму вільного простору. Дано обставина додатково підтверджує те, що раціональне число частин декомпозиції виробу N_D буде відповідати максимальній величині K_V . Число N_D не прагне до нескінченості для забезпечення максимального питомого використаного об'єму робочого простору АМ-установки. Також з'являється обґрунтована умова для раціонального розсічення 3D-моделі виробів - мінімізація сумарної площин частин.

4.5.2 Аналіз просторового розподілу матеріалу виробів

Дослідження розподілу елементарних об'ємів (матеріалу) виробу в просторі виконувалося на основі аналізу його воксельної 3D-моделі. Алгоритм аналізу включав такі дії:

- формування воксельної 3D-моделі робочого простору на базі тріангуляційної 3D-моделі виходячи з розмірів вокселей v_u (ΔX , ΔY , ΔZ) і габаритних розмірів виробу $U_{ws}(L_{part}, W_{part}, H_{part})$ або робочого простору пошарової побудови АМ-установки $U_{ws}(L_X, L_Y, H_Z)$;

- формування підпросторів U_i з урахуванням заданої кількості розбиття простору U_{ws} по кожній з координатних осей X , Y , Z ;

- аналіз розподілу матеріалу виробу (відносної кількості вокселей матеріалу K_{Vi}) за частинами розбиття (підпросторами U_i) робочого простору U_{ws} (рис. 4.5-4.7).

За першою дією формується воксельна модель робочого простору U_{ws} . Така модель являє собою безліч вокселей $U_{ws} = \{v_{u1}, v_{u2}, \dots, v_{un}\}$ з координатами по осях X, Y, Z . Воксельна модель U_{ws} включає вокслі матеріалу $P = \{v_{u1}, v_{u2}, \dots, v_{un}\}$ і вільного простору (без матеріалу) $F = \{v_{u1}, v_{u2}, \dots, v_{un}\}$, тобто $P \in U_{ws}$, $F \in U_{ws}$ за умов $P \cup F = U_{ws}$ і $P \cap F = \emptyset$.

За подальшою дією шляхом розбиття робочого простору U_{ws} формуються підпростори $U_1, U_2, \dots, U_i \in U_{ws}$ із забезпеченням умов:

$$U_1 \cup U_2 \cup \dots \cup U_i = U_{ws};$$

$$U_1 \cap U_2 \cap \dots \cap U_i = \emptyset.$$

Визначення вокселей матеріалу $P_i \in P$ і вільного простору $F_i \in F$, що належать конкретним підпросторам U_i із забезпеченням умов:

$$P_i \cup F_i = U_i; P_1 \cup P_2 \cup \dots \cup P_i = P; F_1 \cup F_2 \cup \dots \cup F_i = F.$$

Апробація алгоритму виконувалася на тестових моделях промислових виробів, представлених на рис. 4.4. Гістограми розподілу матеріалу за підпросторами U_i , створювалися на прикладі тестових моделей (при формуванні 10^3 підпросторів). Загалом, при дослідженні робочий простір було розділено на $N_p = 3^3 \div 10^3$ підпростори ($3 \div 10$ частин по кожній координатній осі). Така кількість N_p є достатньою з урахуванням виявлених обмежень N_D (табл. 4.1) і необхідною для виявлення підпросторів, які не мають вокселей матеріалу $P_i \in \emptyset$. Також прийнято допущення - розбиття на підпростори виконувати відносно власних габаритних розмірів виробу. Такий підхід дозволяє отримати результати дослідження незалежно від габаритних розмірів робочої платформи обраної установки.

На рис. 4.5-4.7 представлено гістограми розподілу відносної наповненості матеріалом підпросторів на прикладах валу, корпусу та вентилятора. У прикладі

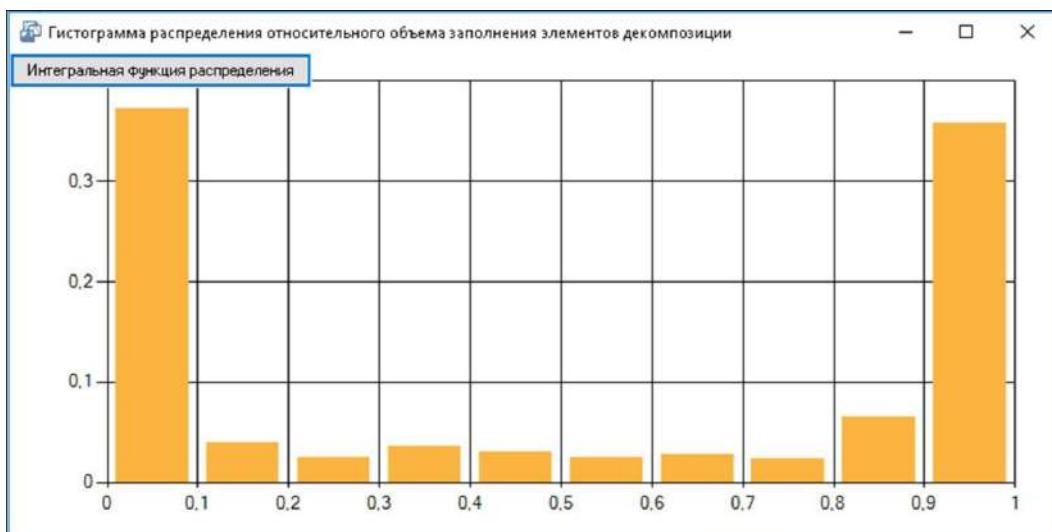


Рисунок 4.5 – Гістограми розподілу відносного вмісту матеріалу по підпросторах для виробу "Вал"

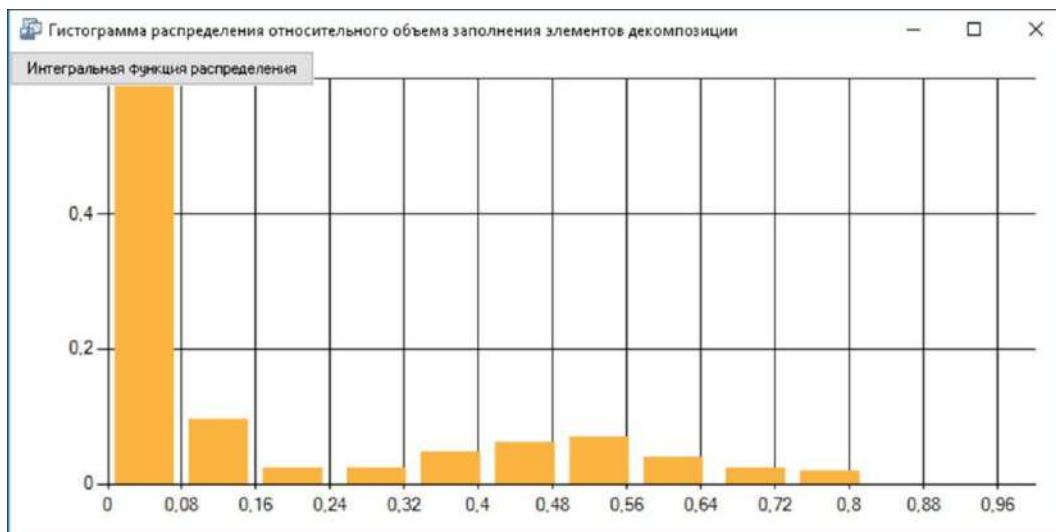


Рисунок 4.6 – Гістограми розподілу відносного вмісту матеріалу по підпросторах для виробу "Корпус"

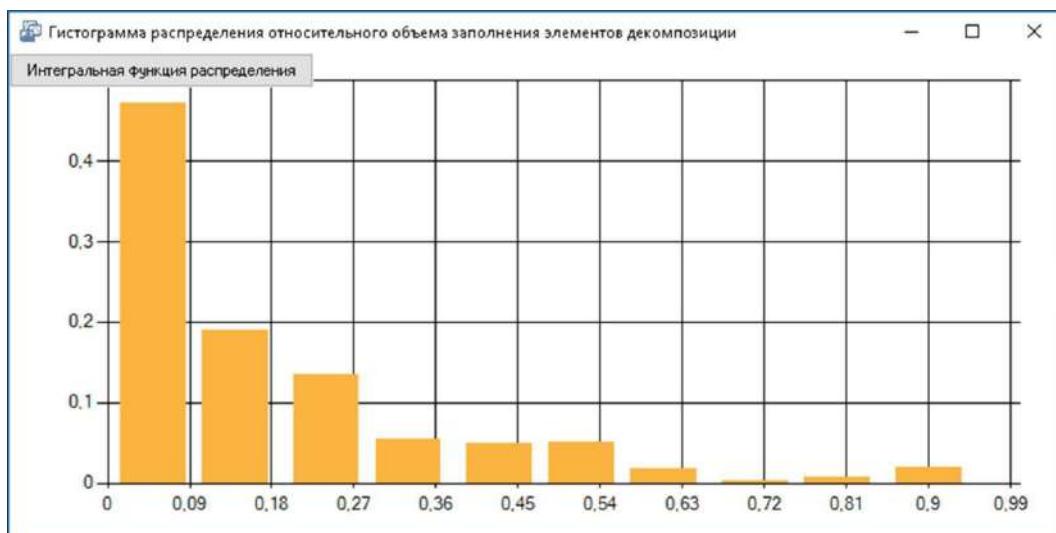


Рисунок 4.7 – Гістограми розподілу відносного вмісту матеріалу по підпросторах для виробу "Вентилятор"

з валом (рис. 4.5) спостерігається істотно більша кількість підпросторів з мінімальним $K_{Vi} \in [0, 0,1]$ і найбільшим $K_{Vi} \in [0,9, 1]$ наповненням.

У прикладі з корпусом (рис. 4.6) спостерігається більше половини підпросторів (58%) з мінімальним наповненням $K_{Vi} \in [0, 0,1]$.

Для вентилятора 46% підпросторів мають наповненість матеріалом виробу $K_{Vi} \in [0, 0,1]$. Відмітною ознакою у порівнянні з валом і корпусом є досить велика кількість (32%) підпросторів з наповненням $K_{Vi} \in [0,1, 0,3]$.

Аналіз гістограм розподілу відносної наповненості підпросторів вокселями матеріалу для тестових 3D-моделей промислових виробів (рис. 4.4) з даними з табл. 4.1 дає можливість виявити взаємозв'язок відносної кількості підпросторів з певною наповненістю на показник K_V . Тому при аналізі розподілу матеріалу виробу визначалась кількість підпросторів, які не мають вокセルей матеріалу N_{V0} ($P_i \in \emptyset$) та не мають вокセルей вільного простору N_{V1} ($F_i \in \emptyset$) і з кількістю вокセルей матеріалу більше половини від загальної кількості $N_{V0,5}$. Отримані результати аналізу представлено в табл. 4.2.

Спільний аналіз даних з табл. 4.1 і 4.2 дозволяє виявити ряд взаємозв'язків:

- загальна кількість підпросторів N_p взаємопов'язана з кількістю розбиття виробу на частини N_D ;
- кількість підпросторів N_{V0} (без вокセルей матеріалу виробу $P_i \in \emptyset$) впливає на ефективність застосування декомпозиції (відносне збільшення питомого використаного об'єму робочого простору);
- кількість підпросторів N_{V1} (без вокセルей вільного простору $F_i \in \emptyset$) впливає на ефективність розміщення виробів в робочому просторі (питомий об'єм на наявний об'єм робочого простору K_V).

4.5.3 Показники прогнозованої ефективності декомпозиції і розміщення виробів в робочому просторі установки

З урахуванням виявленого впливу досліджених ознак розподілу матеріалу за підпросторами на ефективність застосування декомпозиції виробу і

заповнення робочого простору (розд. 4.5.2) запропоновано наступні відносні показники:

- коефіцієнт ефективності декомпозиції

$$K_D = \frac{N_{V0}}{N_p}, \quad (4.5)$$

- коефіцієнт ефективності використання робочого простору установки

$$K_W = \frac{N_{V1}}{N_p}, \quad (4.6)$$

- коефіцієнт ефективності декомпозиції для раціонального використання робочого простору установки

$$K_{DW} = \frac{N_{V0} + N_{V0.5}}{N_p}. \quad (4.7)$$

Відносні показники K_D , K_W , $K_{DW} \in [0, 1]$ дозволяють на основі аналізу воксельної моделі виконувати оцінку просторового розподілу матеріалу. З урахуванням даних табл. 4.1 величина коефіцієнта близька до нуля буде характеризувати конструкцію, яка не підходить для виконання відповідної задачі технологічної підготовки адитивного виробництва даного виробу. Виробам з більшою за величиною коефіцієнтів K_D , K_{DW} (наприклад, вал, лопата і карданний вал) відповідає більш високий рівень ефективності застосування структурної оборотної декомпозиції. Також збільшення кількості частин виробу N_D призводить до істотного зростання ефективності застосування декомпозиції K_D .

За даними табл. 4.1, 4.2 виконано спільний аналіз коефіцієнтів K_V і K_{DW} . Такий аналіз підтверджив висунуту гіпотезу про те, що статистичний аналіз розподілу матеріалу виробів (елементів воксельної 3D-моделі) дозволить виконувати оцінку ефективності застосування структурної оборотної декомпозиції.

З огляду на те, що для ряду виробів отримано несуттєве збільшення показника K_V , то для них застосування декомпозиції виправдано тільки в разі підвищених вимог до заповнення робочого простору установки.

4.5.4 Результати дослідження можливостей оцінки прогнозованої ефективності декомпозиції виробу на основі аналізу воксельної моделі.

За даними дослідження сформульовано наступні умови для раціональної декомпозиції (максимізації показника K_V): кратність розмірів частин виробу заданої величини (окремо по кожній з координатних осей X , Y , Z); мінімізація сумарної площини частин виробу; мінімізація кількості частин виробу; мінімізація кількості підпросторів з мінімальним (але не рівним нулю) питомим наповненням матеріалом виробу, тобто $K_{Vi} \in (0, 0.5)$.

Розроблений алгоритм статистичного аналізу просторового розподілу матеріалу виробу на основі його воксельної моделі, дозволяє з достатньою достовірністю виконувати оцінку прогнозованої ефективності застосування структурної оборотної декомпозиції. Запропоновані показники K_D , K_W , K_{DW} ефективності застосування декомпозиції враховують раціональне використання робочого простору установки адитивних технологій. Недоліком цих показників є те, що не враховується взаємне розташування підпросторів, що належать робочому простору. Особливо важливим є врахування окремо взаємного розташування підпросторів, наповнених матеріалом виробу та підпросторів з вільним простором. Така обставина де facto обмежує застосування запропонованого алгоритму оцінки ефективності декомпозиції.

В результаті створено передумови для комплексного вирішення задач технологічної підготовки адитивного виробництва. Подальше дослідження направлено на спільне вирішення наступних задач: декомпозиція виробу з його раціональною орієнтацією і з формуванням шарів (вибором стратегії розсічення 3D-моделі) у розд. 6.

4.6 Раціональна орієнтація виробу на основі статистичного аналізу вихідної тріангуляційної 3D-моделі

На рис. 4.1, 4.2 представлено схеми виконання етапів технологічної підготовки АМ-процесів. Раціональна орієнтація виробу в робочій області пошарової побудови установки є однією з перших задач, що виконується при

технологічній підготовці. Орієнтація виробу визначає тривалість його виготовлення, похибки формоутворення і фізико-механічні властивості [254]. Задача вибору раціональної орієнтації виробу ускладняється необхідністю врахування безлічі чинників [145, 255].

Виконано досить велику кількість дослідницьких робіт щодо прийняття рішень у виборі орієнтації виробів в області пошарової побудови [75, 109]. У відомих роботах [137, 141, 144, 255-264] завдання раціональної орієнтації виробу в робочій області пошарової побудови виконують з урахуванням обраного одного або декількох факторів. Роботи [137, 144, 258, 263, 264] присвячені процесам лазерної стереолітографії (SLA), [141, 254, 256, 259, 260, 262] - вибіркового лазерного спікання (SLS), моделювання пошаровим наплавленням (FDM) та ін. З безлічі факторів вибирають такі з них (представлені у порядку убування частоти використання в дослідженнях):

- відхилення від правильної форми поверхні, що визначаються кутом нахилу нормалей трикутних граней 3D-моделі щодо осі Z;
- висота виробу по осі Z (по напрямку побудови);
- кількість і геометричні характеристики шарів побудови;
- об'єм структур підтримки;
- площа контакту з структурами підтримки;
- час і собівартість виготовлення;
- параметри шорсткості поверхні, що визначаються кутом нахилу нормалей трикутних граней 3D-моделі щодо осі Z;
- фізико-механічні властивості виробу;
- об'єм закритих порожнин;
- характеристики стійкого положення рівноваги моделі.

В якості найбільш представницьких досліджених ознак тріангуляційної 3D-моделі з урахуванням розглянутих робіт [137, 141, 144, 254-264] для визначення раціональної орієнтації обрано кут нахилу нормалей граней щодо вектора напрямку побудови (координатної осі Z) φ_{NZ} і висота виробу h_Z по осі Z. Дані досліджені ознаки є найбільш значущими з геометричних властивостей 3D-

моделі тому, що φ_{NZ} визначає шорсткість і похибки формоутворення поверхонь виробу і h_Z - час побудови. Інформативність статистичного аналізу розподілу величини кута φ_{NZ} додатково розширюється наступними обставинами:

- поверхні з нормалями, що мають тупий кут φ_{NZ} , визначають конструкцію структур підтримки і, відповідно, трудомісткість процесів постобробки для видалення таких підтримок;
- крок побудови, як правило, задається з урахуванням кута нахилу нормалей граней, а відповідно впливає на час побудови.

Наприклад, в роботі [138] для визначення раціональної орієнтації виробу запропоновано використовувати залежність параметрів шорсткості поверхні виробу від кута нахилу грані φ_{NZ} , отриманої експериментально. Параметри шорсткості обчислюються для кожної грані тріангуляційної 3D-моделі виробу. Цільовою функцією для визначення оптимальної орієнтації є середньоарифметичне значення параметра шорсткості для всієї поверхні моделі виробу. Використання середнього значення дослідженої ознаки призводить до того, що береться до уваги поверхня з грубою шорсткістю.

Визначення орієнтації виробу в роботі [265] виконується шляхом оптимізації при максимізації цільової функції. В якості цільової функції прийнята сумарна площа граней тріангуляційної 3D-моделі з нормалями $|N_Z| = 1$ та $N_Z = 0$, тобто при $\varphi_{NZ} = 0^\circ, 90^\circ$ або 180° , для яких забезпечується мінімальна похибка. В результаті отримується виріб, який буде мати найбільшу площину поверхонь (перпендикулярних і паралельних вектору напрямку побудови) з відсутнім ефектом «ступінчастості». Недоліком такого підходу є обмеженість у застосуванні через те, що не береться до уваги орієнтація всіх граней, тому не може застосовуватися до складних виробів, які, як правило, виготовляються пошаровою побудовою.

У даній роботі висунута наукова гіпотеза про те, що визначення раціональної орієнтації виробу в робочій області пошарової побудови на основі мінімізації площині поверхні з найбільшою величиною похибки формоутворення дозволить стосовно до виробів зі складною геометрією визначати їх раціональну

орієнтацію.

Дослідження можливостей щодо визначення раціональної орієнтації тріангуляційної 3D-моделі в робочому просторі пошарової побудови виконувалося в системі "Технологічна підготовка матеріалізації складних виробів адитивними методами" (розд. 5).

Формування варіанту орієнтації здійснюється перетворенням 3D-моделі шляхом розрахунку координат вершин і векторів нормалей трикутних граней. Визначення координат вершин виконується з урахуванням рівняння послідовного повороту системи координат [206] за такою залежністю:

$$x'_i = x_i \cos(\varphi_Y) + z_i \sin(\varphi_Y), \quad (4.8)$$

$$y'_i = (x_i \sin(\varphi_Y) - z_i \cos(\varphi_Y)) \sin(\varphi_X) + y_i \cos(\varphi_X), \quad (4.9)$$

$$z'_i = -x_i \sin(\varphi_Y) + y_i \sin(\varphi_X) + z_i \cos(\varphi_Y) \cos(\varphi_X), \quad (4.10)$$

де x'_i , y'_i , z'_i - координати вершини $v(x_i, y_i, z_i)$ після повороту 3D-моделі на кут φ_X і φ_Y навколо осей X , Y відповідно.

Висота побудови виробу (або виробів) визначається як розмах величин координат вершин тріангуляційної 3D-моделі по осі Z :

$$h_Z = \{v_k.z'_i\}_{\max} - \{v_k.z'_i\}_{\min}. \quad (4.11)$$

Кути нахилу нормалей граней щодо вектору напрямку побудови α_Z визначаються з урахуванням рівняння повороту системи координат [206] за такою залежністю:

$$\varphi_{NZ} = \frac{180N'_Z}{\pi}, \quad (4.12)$$

$$N'_Z = -N_X \sin(\varphi_Y) + N_Y \sin(\varphi_X) + N_Z \cos(\varphi_Y) \cos(\varphi_X), \quad (4.13)$$

де N'_Z - координата по осі Z вектору нормалі грані $F_j(N_{Xj}, N_{Yj}, N_{Zj})$ після повороту тріангуляційної 3D-моделі.

У розд. 5 описано підсистему статистичного аналізу варіантів орієнтації

виробу в робочому просторі установки, що реалізує можливості з визначення раціональних областей значень кутів повороту 3D-моделі з урахуванням запропонованого критерію.

У наступному підрозділі представлено результати вивчення можливостей раціонального розміщення 3D-моделі в робочому просторі установки із забезпеченням заданих критеріїв оптимізації.

4.7 Задача розміщення 3D-моделі виробу в робочому просторі

Аналіз робіт щодо вирішення задачі раціонального розміщення 3D-моделей виробів (як правило, задачу називають щільною упаковкою, тривимірною упаковкою, завантаженням або задачею про рюкзак [266-269]) показує істотну її складність через низький рівень ефективності застосованих алгоритмів. Данна пошукова задача розглядається в комбінаторній геометрії [270].

При спрощенні задачі, як правило, розглядають розміщення простих геометричних тіл (паралелепіпедів, циліндрів, сфер і т. д.) [270]. Тому в даному розділі приділено увагу пошуку підходів та алгоритмів для вирішення даної задачі.

4.7.1 Класифікація методів рішення

З метою виявлення кращих методів та алгоритмів розміщення 3D-моделей розглядалася їх класифікація. Всю сукупність алгоритмів розміщення можна розділити на дві основні групи: безперервно-дискретні і дискретні [271].

Для дискретних методів використовуються можливі фіксовані позиції для розміщення елементів, тому зміна координат центрів компонентів виконується дискретно. Серед дискретних методів можна виділити наступні групи алгоритмів: алгоритми випадкового пошуку, алгоритми вирішення задачі призначення, евристичні алгоритми. Алгоритм випадкового пошуку становить найбільший інтерес для вивчення його ефективності [267, 272].

В алгоритмах випадкового пошуку відбувається генерація за рівномірним законом номеру позиції або координат розміщення у робочому просторі для

кожної 3D-моделі. Для отриманого випадкового розміщення підраховується значення цільової функції. Після генерації заздалегідь заданої кількості розміщень визначається краще за заданим критерієм. Переваги таких алгоритмів – це можливість проведення багатокритеріальної оптимізації. Недолік - істотне зростання витрат часу при підвищенні точності розрахунків [269].

Відмінною особливістю цього класу задач є труднощі визначення умов виключення взаємного перетинання [269-272]. Використання воксельної моделі виробу таку проблему усуває, але з'являється недолік – це збільшення часу розрахунків. За принципом виконання по суті є задачею оптимізаційного геометричного моделювання, що полягає в оптимізації розміщення геометричних об'єктів в заданих областях.

Розглянутий клас задач, з позиції теорії обчислювальної складності, відноситься до NP-важким [273]. З урахуванням введення обмежень на можливість повороту моделі виробу під час розміщення (анізотропна упаковка) використовують методи глобальної оптимізації. Ці методи представляють лише теоретичний інтерес тому, що переборна складність NP-складної задачі, навіть з урахуванням цих обмежень, не дозволяє знаходити їх точне рішення для достатньої кількості 3D-моделей за прийнятний час [270-272, 274]. Для вирішення ж реальних практичних задач використовуються евристичні методи їх рішення (практична реалізація представлена у розд. 5).

Класифікацію існуючих методів вирішення задач розміщення 3D моделей представлено на рис. 4.8.

При використанні евристичних методів рішення існує два підходи: методи безумовної та умовної оптимізації. У першому випадку для усунення постійної перевірки обмежень на перетинання 3D-моделей між собою і з межами робочого простору, проводиться перехід від завдання умовної до задачі безумовної оптимізації. Це досягається одним з широко відомих методів - методом шрафних функцій. В якості опції штрафу у вихідну цільову функцію додається величина, що характеризує перетин 3D-моделей між собою і з межами простору пошарової побудови [275].



Рисунок 4.8 - Класифікація методів вирішення задачі розміщення 3D-моделей [267, 272, 274]

Існує досить велика різноманітність евристичних методів, що застосовуються для вирішення задач розміщення 3D-моделей [267-269]. В основному ж використовуються два ефективних в застосуванні класи методів. Перший, що відноситься до метаевристики - метод імітації відпалу (*simulated annealing - SA*), генетичний алгоритм (*genetic algorithm, GA*), пошук з заборонами (*tabu search, TS*), мурашиний алгоритм (*ant colonie, AC*). Другий - евристичні спеціальні методи для вирішення цього класу задач.

Методи, які не призводять до взаємного перетину 3D-моделей та з кордоном робочого простору розміщення, дозволяють гарантовано забезпечити допустиме розміщення. З іншого боку необхідно моделювати умови взаємного неперетинання, що є досить трудомістким процесом. Тому розміщення проводиться з фіксованою орієнтацією 3D-моделей.

Методи, засновані на довільних рухах, володіють тією перевагою, що в них не фіксується орієнтація виробу. Однак в результаті збільшується складність алгоритму і з'являється ймовірність (що і відбувається на практиці) того, що пошук такого рішення (якщо воно взагалі існує) може виконуватися нескінченно довго [267].

Виходячи з вищепереліченого класифікації (рис. 4.8), найбільш перспективним для вирішення завдання раціонального розміщення 3D-моделей є використання евристичних методів локального пошуку з виконанням умов відсутності взаємного перетинання [267].

Найбільш прийнятним підходом до вирішення задачі розміщення є сортування та угрупування моделей виробів з урахуванням розподілу за підпросторами вокселей матеріалу і накопичення сформованих таким чином груп моделей для подальшого розміщення в робочому просторі установки. Такий підхід є маловивченим і новим в розробці алгоритмів для даної задачі та потенційно гарантує максимально можливе щільне розміщення виробів. Розробку нових методів розв'язання задачі розміщення моделей в робочому просторі АМ-установки можна віднести до важливого наукового напряму, що має суттєве практичне значення.

Евристичні алгоритми дозволяють значно скоротити витрати машинного часу при значній кількості (більше 10-и) 3D-моделей, які треба розмістити. До даної групи належать послідовні, ітераційні та змішані алгоритми.

Обчислювальна складність вирішення даної задачі в загальній постановці змушує вводити ряд спрощень [267], але при цьому дозволяє знаходити оптимальні розміщення 3D-моделей з прийнятними тимчасовими витратами на розрахунки.

Одне з найпоширеніших спрощень - фіксація орієнтації 3D-моделі в просторі або використання набору фікованих орієнтацій кожного з них [268].

У даній роботі розглядається задача розміщення попередньо орієнтованих і не орієнтованих 3D-моделей. З метою забезпечення комплексного вирішення

задач технологічної підготовки необхідна реалізація можливості перебору варіантів орієнтації з масиву бажаних кутів повороту.

4.7.2 Постановка задачі.

Задачу раціонального розміщення орієнтованих 3D-моделей в робочому просторі можна звести до вирішення наступної математичної задачі. Є набір $M_O = \{M_1, M_2, \dots, M_n\}$, $i = \overline{1, n}$ орієнтованих 3D-моделей (кожна 3D-модель задається у вихідній локальній системі координат).

Робоча область пошарової побудови і вона ж розміщення $S_P \subset \Re^3$, представляє собою:

- прямокутний паралелепіпед

$$S_P = \left\{ (x, y, z) \in \Re^3 : x_{\min} \leq x \leq x_{\min} + L, y_{\min} \leq y \leq y_{\min} + W, z_{\min} \leq z \leq z_{\min} + H \right\},$$

- або прямий циліндр

$$S_P = \left\{ (x, y, z) \in \Re^3 : (y_C - y)^2 + (x_C - x)^2 \leq R^2, z_{\min} \leq z \leq z_{\min} + H \right\},$$

де L - довжина, W - ширина прямокутної області побудови Q ($L = \text{const}$, $W = \text{const}$); R - радіус циліндричної області побудови; H - висота робочого простору побудови U_{ws} , є змінною величиною.

Введемо наступні позначення (у відповідності з прийнятим в роботі [276]):

$M_i(\bar{p}_i)$ - переміщення 3D-моделі M_i на вектор $\bar{u}_i \in \Re^3$, clv^i - граничні точки 3D-моделі виробу M_i , $\text{int } v^i$ - елементи воксельної моделі $M_i = \{v_{u1}, v_{u2}, \dots, v_{uk}\}$, $H(M_i)_{Min}$ - мінімальна висота побудови 3D-моделі M_i , $K_V(M_i)_{Max}$ - максимальна величина відносного заповнення робочого простору 3D-моделями.

Розміщеними 3D-моделями назовемо такий набір параметрів їхнього розміщення $P = \{\bar{p}_1, \bar{p}_2, \dots, \bar{p}_n\}$:

$$M(P) = \left\{ M_1(\bar{p}_1), M_2(\bar{p}_2), \dots, M_n(\bar{p}_n) \right\}, \quad (4.14)$$

при якому виконуються наступні умови (для 3D-моделей M_i, M_j):

$$\begin{cases} \text{int } \nu^i(\overline{p_i}) \cap \text{int } \nu^j(\overline{p_j}) = \emptyset, \quad \forall i = \overline{1, n}, \quad \forall j = \overline{1, n}, i \neq j \\ \nu^i(\overline{p_i}) \cup Q_{ws} = Q_{ws}, \quad \forall i = \overline{1, n}, \quad \nu^i(\overline{p_i}) \in Q_{ws} \end{cases}, \quad (4.15)$$

тобто 3D-моделі виробів не перетинаються між собою, і всі вони знаходяться всередині робочого простору пошарової побудови.

Потрібно для $M_i (i = \overline{1, n})$ знайти таке розміщення композиції 3D-моделей виробів в робочому просторі S_P , щоб забезпечувати один з обраних критеріїв оптимізації:

- висота області побудови (визначається по залежності (4.11)):

$$H_B(M(P)) \rightarrow \min, \quad (4.16)$$

- відносне заповнення робочого простору 3D-моделями (визначається по залежності (4.4)):

$$K_V(M(P)) \rightarrow \max, \quad (4.17)$$

- коефіцієнт ефективності використання робочого простору (визначається по залежності (4.6)):

$$K_W(M(P)) \rightarrow \max. \quad (4.18)$$

Перший варіант цільової функції (4.16) є досить загальноприйнятним [73], подальші (4.17) і (4.18) введені в даній роботі - як найбільш прийнятні для комплексного вирішення технологічних задач підготовки 3D-моделі до матеріалізації адитивними методами пошарової побудови.

4.7.3 Аналіз варіантів вирішення задачі розміщення 3D-моделей

Розглянуту проблему можна віднести до задач математичного програмування [267], в рамках якої визначається раціональний варіант з безлічі допустимих розміщень 3D-моделі в заданому просторі (тобто розміщень, які відповідають заданим обмеженням). Основною метою процедур обмежень є забезпечення умов взаємного неперетинання 3D-моделей [276].

Під раціональним розміщенням заданих 3D-моделей розуміється вибір варіанту з найкращим значенням цільової функції і забезпеченням заданої відстані між деякими їхніми вокселями або крайніми точками моделей, що

визначають габаритні розміри при перевірці взаємного неперетинання при їх розміщенні (виконання умов $cl \nu^i - cl \nu^j \neq \emptyset$, $int \nu^i - int \nu^j = \emptyset$).

4.7.4 Опис особливостей застосованого методу рішення

Нехай дано набір воксельних 3D-моделей $M_O = \{M_1, M_2, \dots, M_n\} : M_i \subset \mathbb{R}^3$, $i = \overline{1, n}$, кожна з яких має свою власну систему координат, задається списком вокселей (множиною об'єктів елементарного об'єму матеріалу виробу). Вважаємо, що воксели $\nu^i = (x^i, y^i, z^i) \subset \mathbb{R}^3$, $i = \overline{1, n}$, кожної з 3D-моделей M_i лежать в першому октанті.

У алгоритмі, що розроблено для формування групи розміщених 3D-моделей в робочому просторі, були реалізовані наступні способи організації процедури:

- послідовне розміщення з упорядкуванням 3D-моделей в порядку зменшення (або збільшення) об'ємів;
- перший відповідний з упорядкуванням 3D-моделей в порядку зменшення (або збільшення) об'ємів;
- «жадібний» метод з вибором на кожному кроці 3D-моделі, яка розміщується з найкращим значенням цільової функції.

4.8 Розміщення групи 3D-моделей в робочому просторі при мультизавантажуванні адитивної установки

Оптимізаційна задача щільного розміщення виробів в робочому просторі установки - NP-важка комбінаторна задача. Задача полягає в раціональному розміщенні (щільній упаковці із заданою мінімально допустимою відстанню між моделями і до країв робочої платформи) 3D-моделей M_i (виробів з відомими геометрією і розмірами) в мінімізації B_{WS} -го числа установок або завантажень для їх матеріалізації. Критерієм оптимізації також може бути максимізація кількості або об'єму 3D-моделей, розміщених в робочому просторі установки. При цьому об'єм робочого простору визначається розмірами платформи та висотою побудови розміщених виробів.

Постановка задачі (формулювання представлено з урахуванням робіт [277, 278]). Нехай дано множину АМ- установок з робочими просторами певних розмірів W, L, H і об'ємом V та множину n_M 3D-моделей виробів з розмірами a_1, a_2, \dots, a_n . Потрібно знайти ціле число робочих просторів АМ- установок B і розбиття множини $\{1, 2, \dots, n\}$ на B_{WS} підмножин $S_1 \cup \dots \cup S_B$ таких, що $\sum_{i \in S_k} a_i \leq V$ для всіх $k = 1, 2, \dots, B$.

Задача раціонального розміщення (упаковки в обмеженому простору) сформулюється таким чином (з урахуванням робот [278, 279]):

$$B_{WS} = \sum_{i=1}^n y_i \rightarrow \min,$$

тобто мінімізація кількості використовуваного обладнання (i – номер установки із загальної кількості n),

- необхідна умова по співвідношенню загальних об'ємів виробів та робочих просторів установок

$$V\{B_j\} \ll V\{M_i\},$$

- при таких обмеженнях

$$\sum_{j=1}^n a_j x_{ij} \leq V_{y_i}, \quad \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}, \quad \forall j \in \{1, \dots, n\},$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \{1, \dots, n\},$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}, \quad \forall j \in \{1, \dots, n\},$$

де $y_i = 1$, якщо i -а установка використовується та $x_{ij} = 1$, якщо j -я модель розміщена у i -й робочий простір.

3D-модель виробу характеризується кількісними параметрами (різноманітністю технологічних параметрів), наприклад, об'ємом, вимогами щодо терміну виготовлення, якості та фізико- механічними характеристиками. Використовувані АМ- установки характеризуються такими параметрами як: об'єм і розміри робочого простору, діапазон кроків побудови і т. д. В тому числі 3D-модель виробу оцінюється за кількома критеріями, які визначають його

якість і точність виготовлення.

Задача вирішується при наступній умові:

$$\sum_{i=1}^B V_i > \sum_{j=1}^M V_j , \quad (4.19)$$

де V_i , V_j – об'єми робочих просторів установок і 3D-моделей виробів відповідно.

Вимоги щодо розміщення групи 3D-моделей виробів:

- кількість розміщених моделей має бути максимально можливою (критерій K_1);
- кількість розміщених моделей з якістю і точністю виготовлення вище необхідного рівня повинно бути максимально можливим (критерій K_2).

Дане завдання є NP -повним і єдиним гарантовано оптимальним методом вирішення є повний перебір. Застосування евристичних алгоритмів дає досить високий рівень ефективності. Розглянемо можливі підходи у формуванні алгоритму розміщення (з урахуванням робіт [278, 280]):

- перший відповідний (3D-моделі виробів і установки упорядковуються довільним чином, 3D-модель розміщується на у перший робочий простір тієї установки, що підходить за розмірами та об'ємом), тимчасова складність алгоритму $\approx O(n)$;
- перший відповідний (3D-моделі виробів упорядковуються за зменшенням об'єму або габаритних розмірів і АМ-установки упорядковуються за їх збільшенням, потім кожна 3D-модель розміщується перебором в перший, відповідний за розмірами робочого простору), тимчасова складність алгоритму $\approx O(n \cdot \log n)$;
- кращий відповідний (аналогічний до першого відповідного, але 3D-модель поміщається в найбільш потрібний, тобто в той робочий простір АМ-установки, де буде найбільший коефіцієнт використаного об'єму), тимчасова складність алгоритму $\approx O(n \cdot \log n)$;

- кращий відповідний регресивний (аналогічний до останнього варіанту, але з попереднім сортуванням 3D-моделей за зростанням їх об'єму), тимчасова складність алгоритму $\approx O(n \cdot \log n)$.

Приймається наступна постановка задачі (позначення з урахуванням роботи [278, 279]):

$$x_i^M = \begin{cases} 1, & \text{якщо } i - \text{y 3D-модель розмістити в } j - \text{ю AM-установку} \\ 0, & \text{інакше} \end{cases},$$

v_{ik} - k -й технологічний параметр i -ї моделі виробу;

v_{jk} - k -й технологічний параметр j -ї установки;

R_i - загальний рейтинг за цінністю параметрів i -ї моделі виробу;

$$I = 1, 2, \dots, N_R;$$

$$I^+ = \{i \in I \mid \forall j \in : R_j \leq R_i, \sum_{j=1}^{B_{WS}} x_k^j \leq \sum_{j=1}^{B_{WS}} x_i^j\} \text{ - множина розміщених 3D-моделей з}$$

рейтингом цінності, більшим у порівнянні з нерозміщеними.

Постановка задачі для розробки програмного забезпечення має такий вигляд:

- максимізація кількості розміщених 3D-моделей:

$$K_1 = \sum_{j=1}^{B_{WS}} \sum_{i=1}^{N_R} x_i^j \rightarrow \max, \quad (4.20)$$

- максимізація кількості розміщених 3D-моделей з великим рейтингом цінності:

$$K_2 = \left| I^+ \right| \sqrt{\sum_{j=1}^{B_{WS}} \sum_{i=1}^{N_R} x_i^j} \rightarrow \max \quad (4.21)$$

- сума по кожному технологічному параметру матеріалізації 3D-моделей, розміщених в j -ю АМ-установку, менше або дорівнює значенню цього параметра для даної АМ-установки:

$$\sum_{j=1}^{B_{WS}} v_{ki} x_i^j; k = 1, \dots, N_R; j = 1, \dots, B_{WS}, \quad (4.22)$$

- кожна 3D-модель розміщується тільки одноразово:

$$\sum_{j=1}^{B_{WS}} x_i^j \leq 1, \forall i = I. \quad (4.23)$$

Розглянемо варіант з рівним рейтингом цінності 3D-моделей. Цільова функція - максимізувати кількість матеріалізованих (розміщених) 3D-моделей.

У разі використання алгоритму "кращий відповідний регресивний" розмістимо n первих 3D-моделей по черзі (скільки можливо максимально помістити). При умові нерозміщення всієї черги 3D-моделей, відкидається модель з найбільшим об'ємом, і повторно застосовуються дії алгоритму. Цикли алгоритму повторюються до закінчення повністю черги. Як раціональне рішення вибирається таке, що забезпечує найбільшу кількість розміщених 3D-моделей.

Дослідження співвідношень за критеріями і параметрами матеріалізації виробів виконується шляхом попарного порівняння по кожній 3D-моделі. При цьому визначається асиметричне транзитивне відношення домінування:

$$P^0 = \{(y_i, y_k) \in Y \times Y \mid \forall r = 1, \dots, N_R; y_i^r \leq y_k^r \text{ и } \exists p: y_i^p < y_k^p\},$$

де $Y = A_1 \times A_2 \times \dots \times A_N$ – множина векторних оцінок;

$y_i = (y_i^1, y_i^2, \dots, y_i^N)$ - довільна векторна оцінка;

N_R - кількість критеріїв оптимізації;

Далі розглянуто наступну оптимізаційну задачу технологічної підготовки процесів адитивного виробництва.

4.9 Адаптивне пошарове розсічення 3D-моделі виробу

Однією з основних задач підготовки до матеріалізації виробу адитивними технологіями є пошарове розсічення вихідної 3D-моделі (створення пошарової 3D-моделі) [252]. Рішення даної задачі досить істотно визначає ефективність використання адитивних технологій. Кількість шарів впливає на час побудови виробу. Точність формоутворення при розгляді одержаного виробу в січній площині, що проходить через координатну вісь O_Z (напрямок побудови), в основному визначається товщиною шарів та орієнтацією поверхні [145, 255].

Наприклад, похилі поверхні, нормаль яких нахиlena під невеликим кутом до вектору напрямку побудови, мають найбільш виражений «ступінчастий» вигляд.

У ряді випадків забезпечення раціонального співвідношення продуктивності виготовлення і точності поверхонь виробів можливе при застосуванні адаптивних способів пошарового розсічення вихідної 3D-моделі.

Результатом процедури розсічення (нарізки паралельними пласкими поверхнями з заданим кроком) 3D-моделі є набір (множина) контурів перетинів і товщин шарів.

Одиничний зріз полігональної (тріангуляційної) 3D-моделі (як правило в файлі STL-формату) утворюється шляхом її перетину горизонтальною площиною XY. Рішення даної задачі має дві проблеми. Перша проблема - визначення товщини шару (кроку побудови), друга - пов'язана з визначенням геометрії замкнутого контуру або декількох контурів без самоперетинання.

Звичайна стратегія нарізки здійснюється при постійному кроці побудови, тобто при однаковій товщині всіх шарів [157]. Такий підхід не враховує особливості геометрії виробу і, отже, призводить до зниження точності виготовлення. Адаптивні стратегії, засновані на використанні змінного кроку побудови, розроблено з метою усунення означеного недоліку [124]. Змінний крок побудови визначається з урахуванням заданого критерію на основі аналізу 3D-моделі в поточному шарі.

Аналіз відомих робіт дозволив виділити наступні підходи щодо реалізації стратегій розсічення:

- рівномірне розсічення набором площин STL-файлу виробу (полігональної 3D-моделі) з використанням кускового лінійного опису контуру перетину [158-160];

- адаптивне розсічення STL-файлу з використанням кускових лінійних кривих для опису контуру перетину [139, 161, 162];

- адаптивне розсічення CAD-моделі з подальшим використанням кускової лінійної апроксимації контуру [163-166];

- рівномірне або адаптивне розсічення CAD-моделі з точним або приблизним аналітичним описом контуру кривими лініями [167-169].

Основна проблема полягає в тому, що в існуючих роботах при адаптивному нарізанні (розсіченні) 3D-моделей крок побудови вибирається виходячи з граничних значень кутів нахилу нормалей поверхонь, що потрапили в січну площину шару. При врахуванні розподілу кутів нахилу нормалей поверхонь з урахуванням їх площин з'являється можливість для обґрунтованого вибору граничних їх значень щодо визначення раціонального кроку побудови.

У даній роботі розглянута наукова гіпотеза про те, що статистичний аналіз розподілу кутів нахилу нормалей поверхонь, що потрапили в перетин шару з урахуванням їх відносної площини, дозволить науково-обґрунтовано визначати крок побудови для забезпечення заданої точності і зменшення часу побудови виробу.

Для досягнення поставленої мети вирішено наступні задачі:

- реалізувати переход від вихідної тріангуляційної 3D-моделі виробу до набору шарів (2D-перетинів);
- реалізувати виконання процедури визначення кроку побудови і статистичного аналізу розподілу кутів нахилу нормалей поверхонь з урахуванням їх площини;
- виконати порівняльний аналіз стратегій розсічення 3D-моделі на прикладі простих геометричних фігур і складних промислових виробів.

Реалізація переходу від вихідної тріангуляційної 3D-моделі виробу до набору шарів (2D-перетинів) виконувалася в рамках системи технологічної підготовки матеріалізації складних виробів адитивними методами (розд. 5).

Перехід від вихідної тріангуляційної 3D-моделі виробу до набору шарів виконувався за процедурою з урахуванням існуючих робіт [281, 282], що реалізує стратегію з постійним і змінним кроком побудови.

При виконанні процедури розсічення на першому етапі створюється список координат шарів Z_{Ci} . На другому - визначення контурів для кожного шару. Список координат Z_{Ci} формується за такою залежністю:

$$Z_{Ci} = Z_{Ci} + h_i, \quad Z_{Ci} \in [Z_{\min}, Z_{\max}), \quad (4.24)$$

де Z_{\min} , Z_{\max} - мінімальна і максимальна координата вершин тріангуляційної 3D-моделі;

h_i - крок побудови, для стратегії з постійним кроком $h_i = const$, Для адаптивної стратегії $h_i \in [h_{\min}, h_{\max}]$;

h_{\min} , h_{\max} - мінімальне і максимальне значення інтервалу кроків побудови, що визначаються використаними АМ-обладнанням і вихідним матеріалом виробу.

У методах адаптивного розсічення 3D-моделі, як правило, крок побудови h_i задається з урахуванням заданого обмеження Δ_s за відхиленням форми поверхонь (границно допустимої похибки формоутворення) [282]:

$$h_i = \frac{\Delta_s}{\cos \varphi_{NZ \min}}, \quad (4.25)$$

де $\varphi_{NZ \min}$ - мінімальний кут нахилу щодо осі Z нормалі граней в поточному шарі.

Рішення задачі адаптивного розсічення 3D-моделі складного виробу включає в себе наступні проблеми:

- необхідність враховувати всю поверхню 3D-моделі, що потрапила між площинами поточного і наступного шару;
- нерівномірний розподіл площі поверхні по кутах φ_{NZ} .

Перша проблема виникає через первісну невизначеність поточного кроку побудови h_i . У запропонованому методі адаптивного розсічення 3D-моделі дана проблема вирішується початковим розсіченням 3D-моделі від поточної площини до площини, що визначається найбільшою допустимою величиною кроку побудови h_{\max} з кроком рівним дискретності завдання координат розташування шару по осі Z_i .

Друга проблема виникає у зв'язку з матеріалізацією 3D-моделей, складних за геометрією промислових виробів. Наслідком обох проблем є необґрунтоване завдання кроку побудови за неповною інформацією щодо поверхні формоутвореної поточним шаром. У зв'язку з існуючим нерівномірним

розділом площі поверхні по кутах φ_{NZ} для складних виробів задається занизений по величині крок побудови, що визначається за залежністю (4.25). На практиці враховувати поверхні з нормалями, що мають мінімальне відхилення від осі Z (напрямки побудови) може бути надмірним при відносній їх площі менш $5\div30\%$. Таку обставину можна врахувати урізанням щільності розподілу φ_{NZ} в поточному шарі на допустиму величину відносної площі. Допустима величина усічення буде визначатися несуттєвим впливом на підсумкові показники якості і точності поверхні виробу. Таке усічення дозволить збільшити кут $\varphi_{NZ\min}$, відповідно з урахуванням залежності (4.25), збільшити допустиму величину кроку побудови h_i . В результаті з'являється можливість при забезпеченні на практиці заданого граничного відхилення форми поверхні мінімізувати кількість шарів і час побудови за рахунок збільшення h_i .

Запропонована адаптивна стратегія розсічення 3D-моделі, що виконується за схемою, представленою на рис. 4.9.

Дослідження можливостей стратегій розсічення 3D-моделі виконувалося шляхом порівняльного аналізу кількості шарів, отриманих на прикладі тестових моделей простих геометричних тіл і промислових виробів (рис. 4.10).

З методичних міркувань порівнювалися наступні стратегії:

- з постійним кроком, $h_i = h_{\min}$;
- зі змінним кроком (враховуються трикутні грані, що перетинаються площиною шару), $h_i = f(\Delta_s, \varphi_{NZ})$ за залежністю (4.25);
- зі змінним кроком (враховуються трикутні грані в межах товщини шару), $h_i = f(\Delta_s, \varphi_{NZ})$;
- зі змінним кроком (задається допустиме урізанням розподілу мінімального кута φ_{NZ}), $h_i = f(\Delta_s, \varphi_{NZ})$.

Стратегія з постійним кроком виконувалася при $h_i = 0,1$ мм. Стратегія зі змінним кроком при $\{h_i\}_{\min} = 0,1$ мм, $\{h_i\}_{\max} = 0,3$ мм і допустимою (максимальною) похибкою формування поверхні $\Delta_s = 0,1$ мм. Адаптивна стратегія розсічення виконувалася при 5% усіченні за площею поверхні для

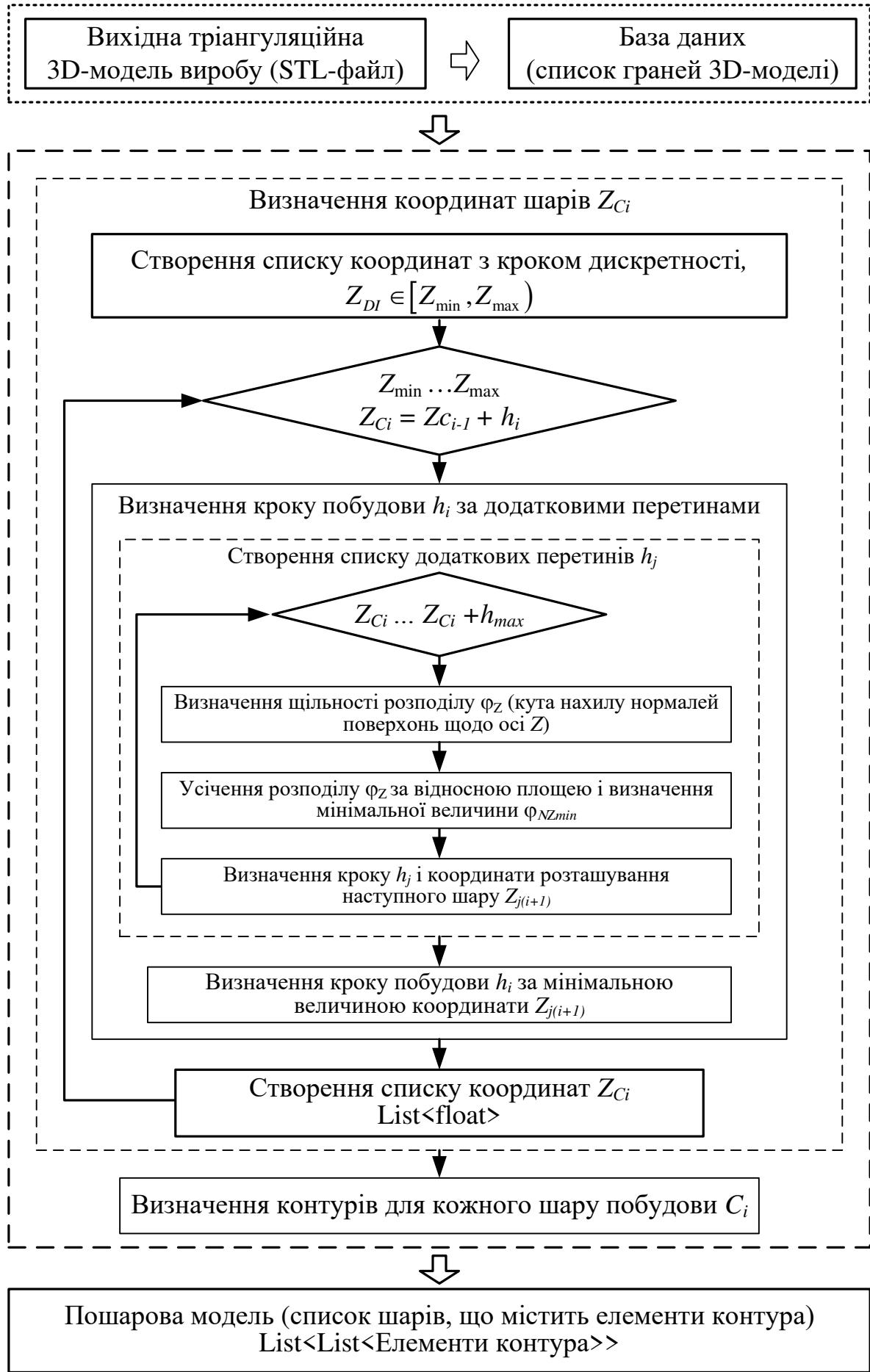
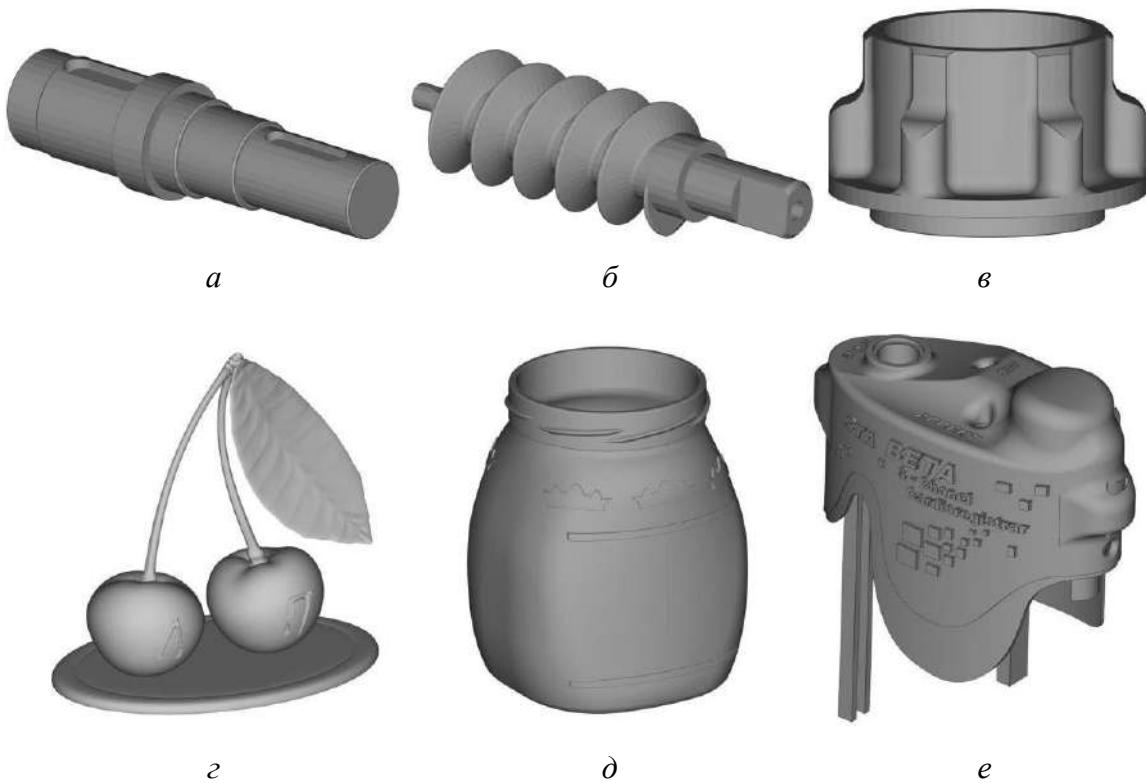


Рисунок 4.9 – Схема формування шарів при адитивному розсіченні 3D-моделі



a) вал; б) шнек; в) корпус; г) сувенір; д) ємність; е) кришка

Рисунок 4.10 – Тестові 3D-моделі

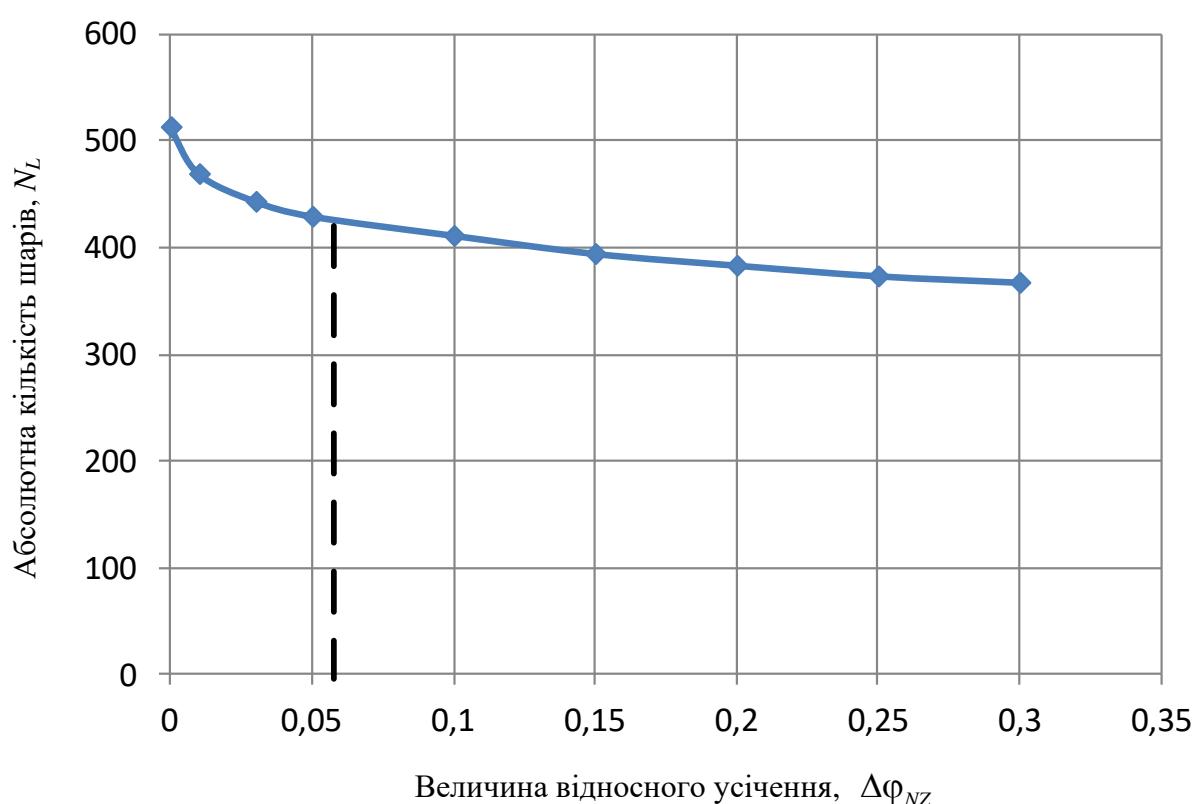


Рисунок 4.11 – Залежність кількості шарів для виготовлення 3D-моделі сувеніра від відносної величини усічення щільності розподілу кута Φ_{NZ}

гістограми розподілу кутів φ_{NZ} . Результати розрахунків наведено в табл. 4.3 і 4.4.

Таблиця 4.3 - Порівняльний аналіз стратегій пошарової побудови тестових 3D-моделей простих геометричних тіл за кількістю шарів

№	Модель (габаритні розміри, мм)	Кількість шарів, N_L			
		Постійний крок	Змінний крок (по одному розділенню)	Змінний крок (по мікро- розділеннях)	Змінний крок (з усіченням φ_{NZ})
1	Куб ($L = 100$)	1000	334	333	333
2	Сфера ($D = 100$)	1000	579	594	591
3	Конус ($D = 100, H = 100$)	1000	455	455	455
4	Тор ($D = 100, d = 10$)	100	59	60	60
5	Циліндр ($D = 100, H = 100$)	1000	334	333	333
6	Пружина (100x100x10)	1100	1100	1100	1099

Аналіз даних по табл. 4.3 демонструє перевагу стратегій зі змінним кроком в порівнянні з постійним кроком. Але ця перевага є загальною для стратегій зі змінним кроком незалежно від обраного підходу у визначені кроку побудови. На прикладі простих геометричних тіл відмінностей між стратегіями зі змінним кроком не спостерігається.

Таблиця 4.4 - Порівняльний аналіз стратегій пошарової побудови тестових 3D-моделей промислових виробів за кількістю шарів

№	Модель (габаритні розміри, мм)	Кількість шарів, N_L			
		Постійний крок	Змінний крок (по одному розділенню)	Змінний крок (по мікро- розділеннях)	Змінний крок (з усіченням φ_{NZ})
1	Вал ($64 \times 64 \times 138$)	600	424	432	431
2	Шнек ($40 \times 40 \times 144$)	401	328	339	314
3	Корпус ($210 \times 210 \times 125$)	1251	569	582	566
4	Сувенір ($73 \times 51 \times 70$)	702	498	514	430
5	Ємність ($102 \times 94 \times 125$)	1256	584	595	555
6	Кришка ($84 \times 101 \times 43$)	433	392	405	360

Результати модельних розрахунків на прикладі 3D-моделей промислових виробів дозволили виявити відмінність у стратегіях зі змінним кроком побудови. Дано відмінність за кількістю шарів N_L , що збільшується для складних за геометрією виробів. Отримані дані (табл. 4.4) дозволяють зробити висновок

щодо ефективності стратегії з урізанням розподілу кута φ_{NZ} для досить складних за геометрією виробів.

Окреме вивчення запропонованої стратегії зі змінним кроком виконувалося при варіюванні величини відносного усічення розподілу кута $\Delta\varphi_{NZ} \in [0, 0,3]$. Результати дослідження на прикладі 3D-моделі сувеніра представлені в табл. 4.5. Дано модель обрана як найбільш складна з розглянутих.

Виходячи з отриманих результатів модельних досліджень (табл. 4.5) можна визначити раціональний рівень усічення розподілу $\Delta\varphi_{NZ}$. На прикладі моделі сувеніра достатнім є усічення розподілу кута φ_{NZ} у даному інтервалі відносних величин $\Delta\varphi_{NZ} \leq 0,2$. Подальше збільшення $\Delta\varphi_{NZ}$ не дає істотного зменшення кількості кроків побудови при достатньому впливі на середню величину відхилення форми поверхонь виробу. Стосовно до 3D-моделі сувеніру раціональною величиною усічення є $\Delta\varphi_{NZ} = 0,05$.

Таблиця 4.5 - Вплив величини відносного усічення щільності розподілу кута нахилу нормалей поверхні φ_{NZ}

№	Величина відносного усічення, $\Delta\varphi_{NZ}$	Абсолютна кількість шарів, N_L	Відносне зменшення кількості шарів, $N_{L(i)}/N_{L(1)}$
1	0	514	1,00
2	0,01	470	0,91
3	0,03	444	0,86
4	0,05	430	0,84
5	0,10	412	0,80
6	0,15	395	0,77
7	0,20	384	0,75
8	0,25	374	0,73
9	0,30	368	0,72

В наступному розд. 5 розглянуто питання розробки системи технологічної підготовки матеріалізації складних виробів адитивними методами на основі запропонованих підходів вирішення оптимізаційних задач.

Висновки за розділом.

1. Запропоновано методологію технологічної підготовки АМ-процесів яка дозволяє в єдиному комплексі вирішувати задачі структурної оборотної декомпозиції, раціональної орієнтації, вибору стратегії пошарового формоутворення і розташування 3D-моделі виробу в робочому просторі на основі науково-обґрунтованих єдиних критеріїв оцінки їхньої ефективності.

2. В рамках методології технологічної підготовки АМ-процесів розроблено схему виконання оптимізаційних задач. Запропонована схема є трудомісткою через істотне збільшення кількості варіантів вирішення задач технологічної підготовки і, відповідно, варіантів матеріалізації групи виробів. З метою зменшення кількості розрахованих варіантів запропоновано виконання попередньої оцінки конструкції виробу на основі аналізу тріангуляційної, воксельної та пошарової 3D-моделі щодо доцільності виконання задач технологічної підготовки або їх спрощеного рішення (мінімізації варіантів їх реалізації).

3. На основі результатів статистичного аналізу воксельної моделі виробу та впливу числа його частин на використаний питомий об'єм робочого простору, виявлено показники прогнозованої ефективності застосування структурної оборотної декомпозиції. Запропоновані показники становлять інтерес для прийняття обґрунтованого рішення щодо раціонального застосування декомпозиції для максимізації питомого використаного об'єму робочого простору АМ-установки.

4. Виконано аналіз впливу числа частин виробу, одержаних в результаті його декомпозиції, на використаний питомий об'єм робочого простору АМ-установки. В результаті виявлено деякі особливості такого впливу. Число частин виробу не прямує до нескінченості для забезпечення максимального наповнення. Така обставина пояснюється збільшенням сумарної площі частин виробів та існуючою мінімально допустимою відстанню між ними.

5. Сформульовано принципи ефективного використання робочого простору установок на основі статистичного аналізу щільності розподілу

елементарних об'ємів окремих виробів та їх композицій в робочому просторі установки. Розбиття робочого простору на підпростори і визначення їх відносного наповнення матеріалом виробів дозволяє виконувати оцінку ефективності таких трьох задач: структурна оборотна декомпозиція, орієнтація та розміщення.

6. Запропоновано алгоритми розв'язання задачі раціонального розміщення 3D-моделей виробів в робочому просторі АМ-установки. Генетичний алгоритм розміщення дозволяє знаходити прийнятне рішення з урахуванням заданих обмежень за поліноміальний час, що є достатнім для використання його не тільки в дослідницьких але і в інженерних задачах. Крім того, можливість направленої модифікації генетичних операторів дозволяє прискорити отримання результатів і, відповідно, допомагає частково уникнути значних витрат часу на пошук найбільш раціональних варіантів розміщення.

7. Статистичний аналіз розподілу кутів нахилу від осі Z нормалей поверхонь, що потрапили у перетин шару з урахуванням їх відносної площин, дозволяє науково-обґрунтовано визначати крок побудови для забезпечення заданої точності і зменшення часу побудови виробів.

8. Результати роботи створюють методологічну основу для комплексного вирішення задач технологічної підготовки адитивного виробництва. Пропонується спільне вирішення наступних задач: декомпозиція виробу з його раціональною орієнтацією і розміщенням в робочому просторі установки з формуванням шарів (вибором параметрів адаптивного пошарового розсічення).

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ МАТЕРІАЛІЗАЦІЇ СКЛАДНИХ ВИРОБІВ АДИТИВНИМИ МЕТОДАМИ

У цьому розділі обґрунтовано концепцію розробленої системи технологічної підготовки матеріалізації складних виробів адитивними методами. Розробка системи реалізована в об'єктно-орієнтованому середовищі програмування. Розглянуто її структуру та основні елементи. Сформульовано комплекс умов, необхідних для реалістичного виконання задач технологічної підготовки АМ-процесів і статистичного аналізу досліджених ознак. Комплекс умов включає в себе: наявність технологічної та еволюційної подібності процесу формування моделі (на основі аналізу пошарової 3D-моделі виробу); технологічної - на етапі формування шарів виробу; еволюційної - при його зміні в процесі формоутворення та подальшої усадки реального виробу); геометричної подібності 3D-моделі виробу; статистичної подібності з розподілу характеристик пошарової побудови та технологічних параметрів формоутворення; структурної - виконання задач з урахуванням їх взаємозв'язку та технологічних особливостей АМ-процесів.

Наведено структуру та основні елементи розробленої системи технологічної підготовки матеріалізації складних виробів адитивними методами. Додатково до вихідної полігональної (тріангуляційної) 3D-моделі виробу використано воксельну та пошарову (представлену набором шарів з 2D-контурами виробу) моделі. Тріангуляційна 3D-модель – це модель для аналізу конструкції на технологічність та пристосованість до виконання технологічних задач. Воксельна – модель для вивчення розподілу елементарних об'ємів (матеріалу) виробу в робочому просторі пошарової побудови АМ-установки. Пошарова – модель для оцінки ефективності стратегії розсічення та можливості точного відтворення контурів перетинів.

5.1 Структура та основні елементи системи технологічної підготовки

Об'єктно-орієнтовану систему технологічної підготовки матеріалізації складних виробів адитивними технологіями, розроблено на кафедрі «Інтегровані технології машинобудування» ім. М.Ф. Семка НТУ «ХПІ». Основне призначення системи - статистичний аналіз досліджуваних ознак тріангуляційної і воксельної 3D-моделі та пошарового формування виробу з метою отримання рекомендацій щодо раціонального виконання технологічних задач при його матеріалізації. Данна система розроблена в інтегрованому середовищі розробки Microsoft Visual Studio [283].

Головна екранна форма системи представлена на рис. 5.1. Форма розділена на кілька функціональних областей. Представленій список варіантів розрахунків з можливістю коментування в текстовому полі примітки. Є можливість перегляду історії дій за варіантами розрахунку.

Система технологічної підготовки надає користувачеві наступні основні можливості для роботи:

- завантажувати дані щодо геометрії виробу (групи виробів) з вихідного STL-файлу (текстового або бінарного формату) для подальшого аналізу (екранну форму підсистеми імпорту даних представлено на рис. 5.2);
- переглядати вихідні дані тріангуляційної 3D-моделі виробу та виконувати передачу даних в список екземплярів класу трикутної грані (рис. 5.3);
- створювати воксельну модель за тріангуляційною 3D-моделлю виробу (рис. 5.4);
- виконувати статистичний аналіз розподілу елементарних об'ємів воксельної 3D-моделі (рис. 5.5);
- генерувати набір перетинів (розсічень) 3D-моделі виробу із заданим кроком дискретизації, відображати їх для візуального аналізу, виконувати статистичний аналіз досліджених ознак контурів перетинів. Екранну форму з візуалізацією перетину представлено на рис. 5.6, з таблицею для перегляду результатів статистичного аналізу на рис. 5.7;

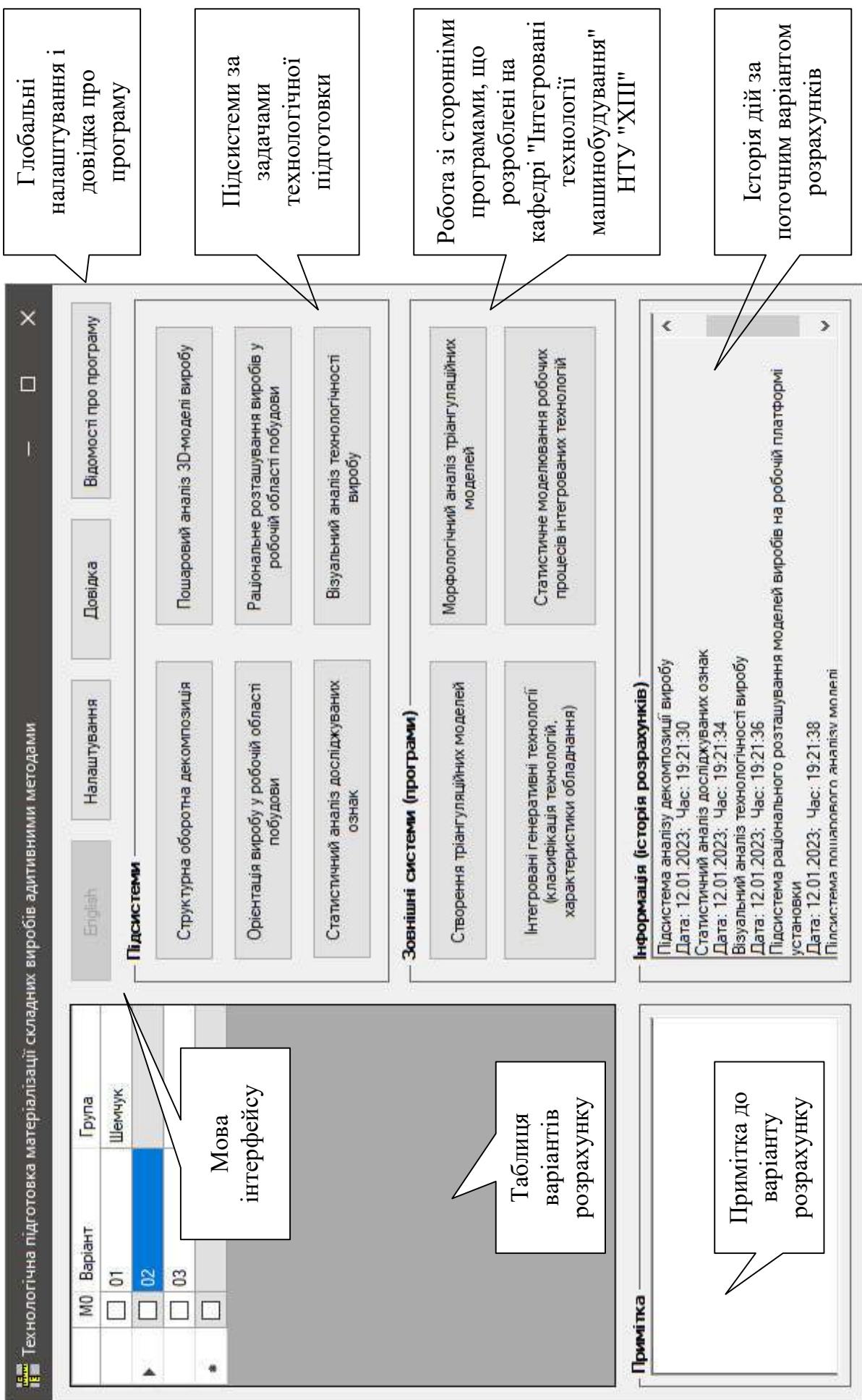


Рисунок 5.1 – Головна екранна форма системи технологічної підготовки матеріалізації складних виробів адитивними методами

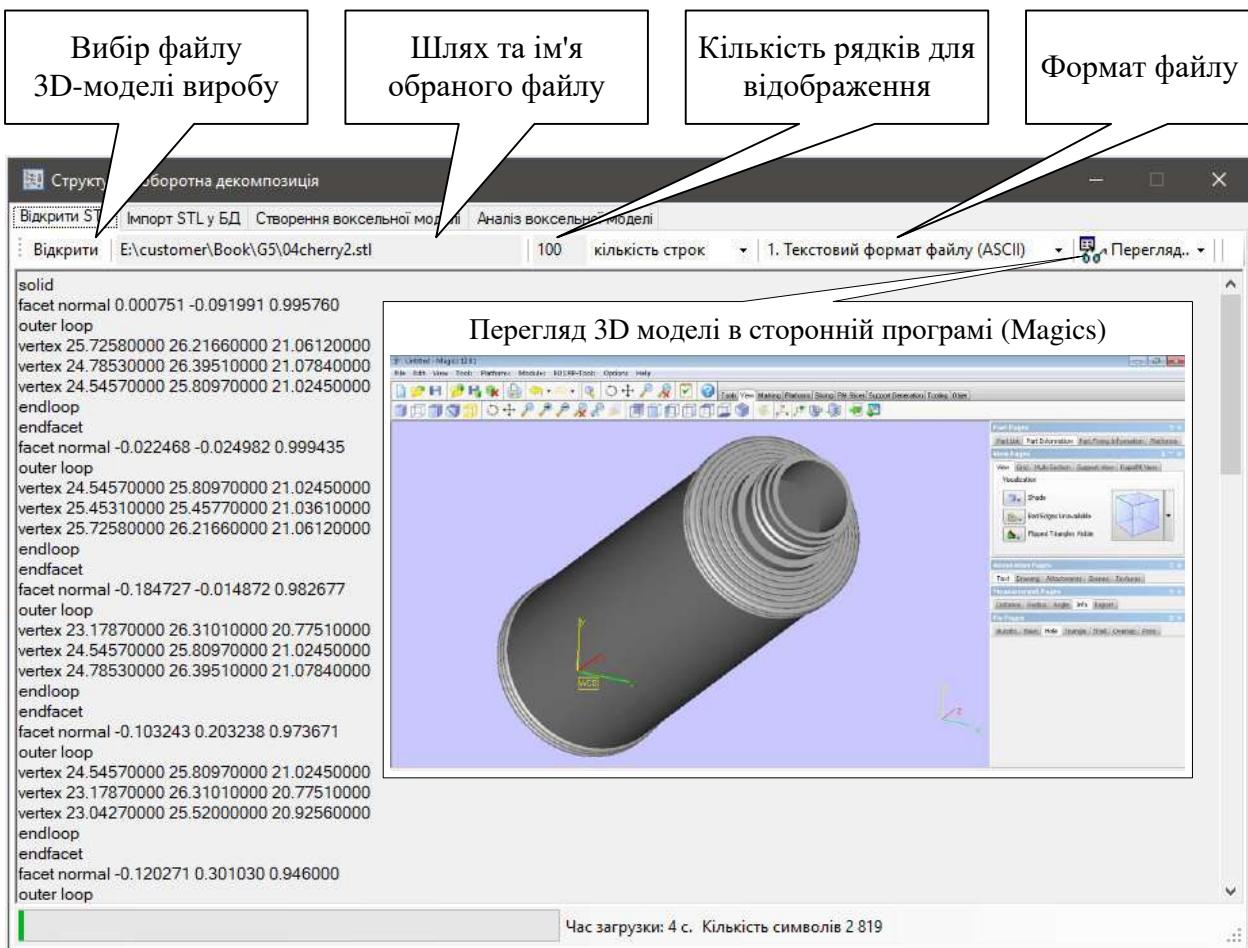


Рисунок 5.2 – Екранна форма імпорту даних STL-файлу 3D-моделі

Структурна оборотна декомпозиція									
Імпорт STL у БД Створення воксельної моделі Аналіз воксельної моделі									
Створення таблиці даних трикутників 1. Перегляд таблиці 10									
# трикут.	X1	Y1	Z1	X2	Y2	Z2	X3	Y3	
1	25.72580000	26.21660000	21.06120000	24.78530000	26.39510000	21.07840000	24.54570000	25.80970000	
2	24.54570000	25.80970000	21.02450000	25.45310000	25.45770000	21.03610000	25.72580000	26.21660000	
3	23.17870000	26.31010000	20.77510000	24.54570000	25.80970000	21.02450000	24.78530000	26.39510000	
4	24.54570000	25.80970000	21.02450000	23.17870000	26.31010000	20.77510000	23.04270000	25.52000000	
5	23.04270000	25.52000000	20.92560000	23.80020000	25.14480000	21.14130000	24.54570000	25.80970000	
6	25.45310000	25.45770000	21.03610000	24.54570000	25.80970000	21.02450000	24.67350000	24.62690000	
7	24.67350000	24.62690000	21.26000000	25.61180000	23.77980000	21.20840000	25.45310000	25.45770000	
8	23.80020000	25.14480000	21.14130000	24.67350000	24.62690000	21.26000000	24.54570000	25.80970000	
9	27.74110000	25.41240000	20.52790000	27.99810000	22.68080000	20.05590000	29.03970000	25.72680000	
10	27.99810000	22.68080000	20.05590000	27.74110000	25.41240000	20.52790000	27.02100000	23.44460000	
11	26.83310000	25.99250000	20.85680000	25.72580000	26.21660000	21.06120000	26.36170000	24.68220000	
12	25.45310000	25.45770000	21.03610000	26.36170000	24.68220000	20.89020000	25.72580000	26.21660000	
13	26.36170000	24.68220000	20.89020000	27.02100000	23.44460000	20.64480000	27.74110000	25.41240000	
14	27.74110000	25.41240000	20.52790000	26.83310000	25.99250000	20.85680000	26.36170000	24.68220000	
15	27.02100000	23.44460000	20.64480000	26.36170000	24.68220000	20.89020000	25.61180000	23.77980000	
16	26.36170000	24.68220000	20.89020000	25.45310000	25.45770000	21.03610000	25.61180000	23.77980000	
17	26.90090000	23.66890000	4.38130000	25.56410000	22.54800000	3.86520000	26.23930000	25.18420000	
18	26.98130000	22.08320000	4.96280000	25.56410000	22.54800000	3.86520000	26.90090000	23.66890000	
19	26.98130000	22.08320000	4.96280000	25.87410000	20.70420000	4.81450000	25.56410000	22.54800000	
20	24.67480000	23.85800000	3.12030000	23.05220000	24.32470000	2.51410000	23.18380000	24.75740000	

Масив даних не створено

Рисунок 5.3 – Екранна форма перегляду даних 3D-моделі, їх аналізу та формування списку екземплярів класу "base_Face" (клас трикутної грані)

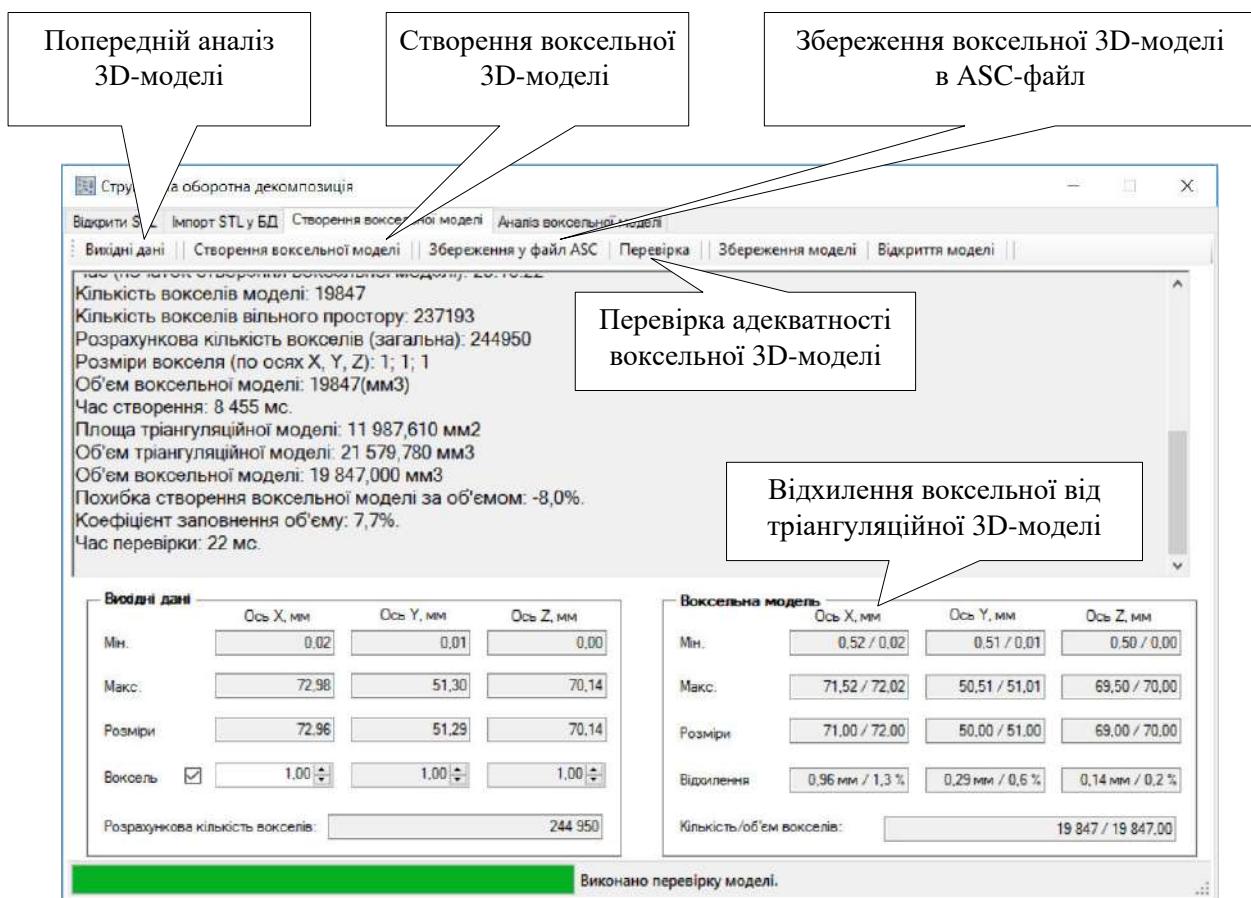


Рисунок 5.4 – Екранна форма створення виксельної моделі

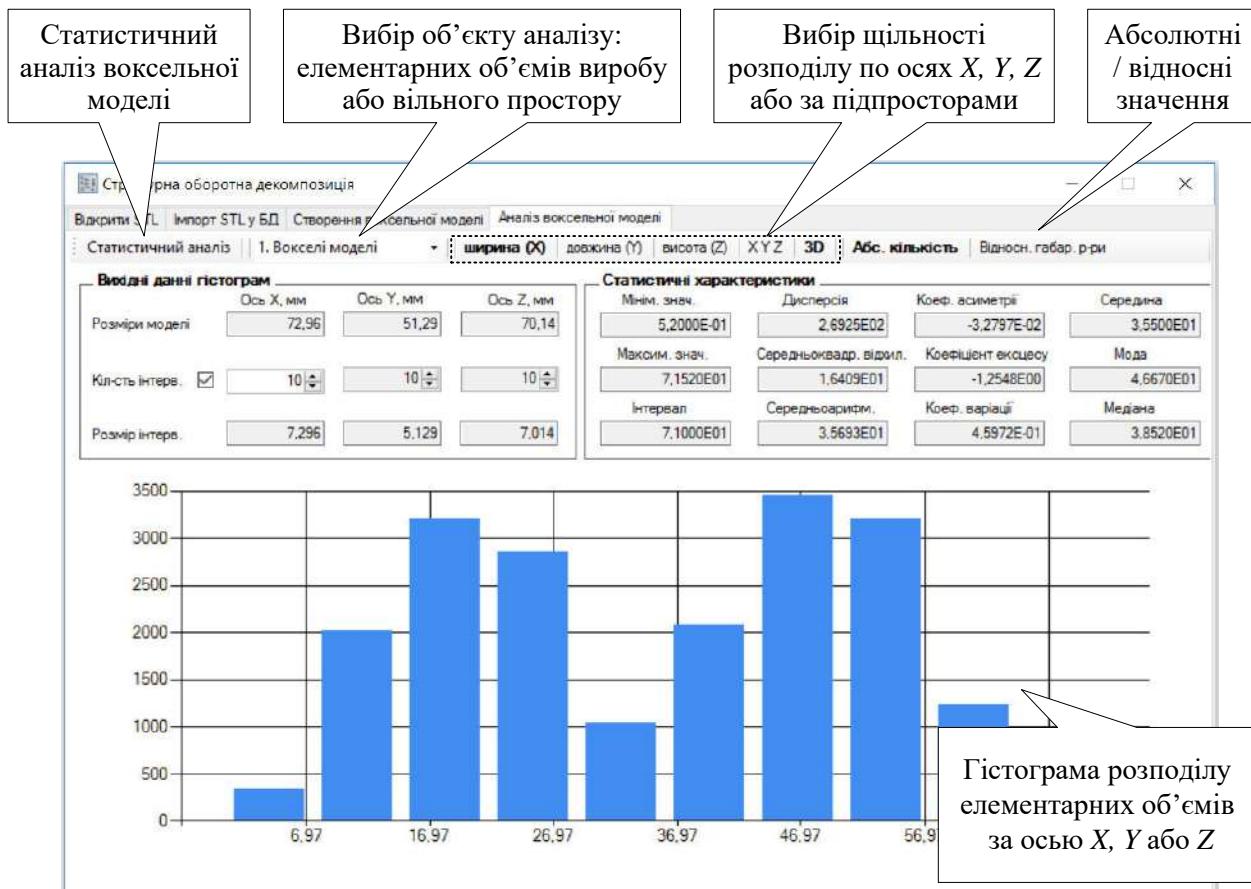


Рисунок 5.5 – Екранна форма статистичного аналізу розподілу елементарних об'ємів виробу або вільного простору

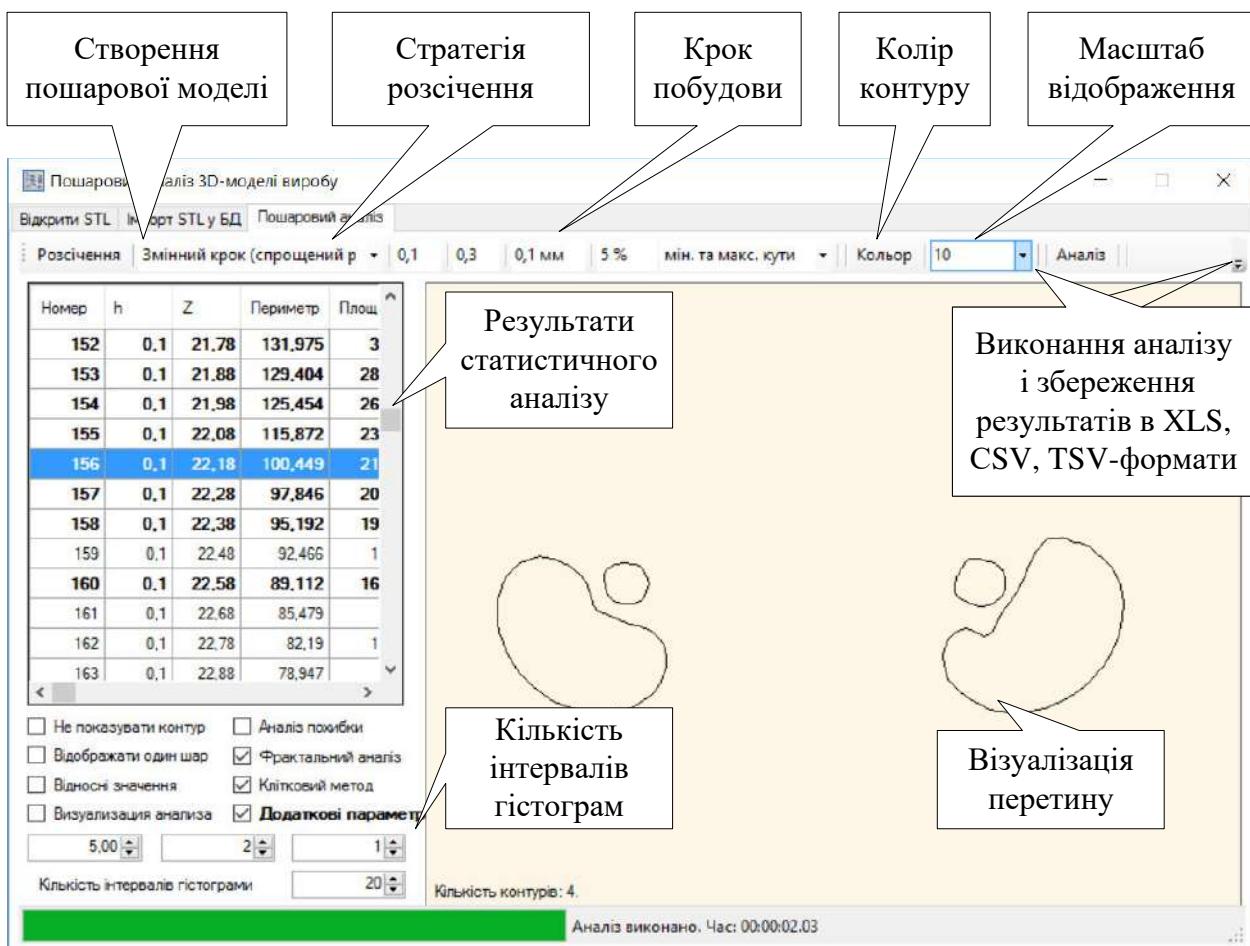


Рисунок 5.6 – Екранна форма підсистеми пошарового аналізу

Пощаровий аналіз 3D-моделі виробу									
Номер	h	Гістограма Nz	Гістограма A	Мін. Nz	Макс. Nz	Размах Nz	Дисперсія Nz	Середньовідхилення Nz	Сер. ариф
152	0,1	Перегляд	Перегляд	5,024728	122,491	117,4663	789,2231	28,09311	46,60571
153	0,1	Перегляд	Перегляд	7,480603	122,491	115,0104	896,5603	29,94262	47,86595
154	0,1	Перегляд	Перегляд	3,851072	122,491	118,6399	945,4053	30,74744	48,53223
155	0,1	Перегляд	Перегляд	3,480991	122,491	119,01	1010,084	31,78182	51,70388
156	0,1	Перегляд	Перегляд	13,13281	122,491	109,3582	974,9319	31,2239	57,08888
157	0,1	Перегляд	Нема даних	13,13281	122,491	109,3582	986,7231	31,41215	57,45367
158	0,1	Перегляд	Перегляд	11,80432	122,491	110,6867	1044,768	32,32286	57,58137
159	0,1	Перегляд	Перегляд	7,241344	122,491	115,2496	1053,305	32,45466	57,00442
160	0,1	Перегляд	Перегляд	5,810047	122,491	116,6809	1071,844	32,73903	56,28023
161	0,1	Перегляд	Перегляд	5,810047	122,491	116,6809	1076,666	32,81259	56,7823
162	0,1	Перегляд	Перегляд	5,810047	120,0114	114,2014	1016,351	31,88027	56,01637
163	0,1	Перегляд	Перегляд	14,90692	120,0114	105,1045	968,1243	31,11469	55,16122
164	0,1	Перегляд	Перегляд	12,48702	114,6428	102,1558	946,8391	30,77075	53,90056
165	0,1	Перегляд	Перегляд	12,42592	104,9778	92,55189	909,6387	30,16022	51,47058
166	0,1	Перегляд	Перегляд	7,129565	104,9778	97,04825	873,7502	29,55927	51,61164
167	0,1	Перегляд	Перегляд	7,129565	102,8312	95,70161	845,5217	29,07786	49,96347
168	0,1	Перегляд	Перегляд	4,371346	98,74047	94,36913	862,2437	29,36399	51,62554
169	0,1	Перегляд	Перегляд	4,431068	98,5826	94,15153	876,3618	29,60341	53,54185
170	0,1	Перегляд	Перегляд	4,431068	95,00462	90,57355	895,5945	29,92649	54,54216

Bottom status bar: Аналіз виконано. Час: 00:00:02.03

Рисунок 5.7 – Результати статистичного аналізу досліджених ознак

- візуалізувати тріангуляційну 3D-модель виробу в зовнішніх спеціальних програмах;
- виконувати статистичний аналіз варіантів орієнтації виробу в робочій області пошарової побудови (екранну форму підсистеми представлено на рис. 5.8).
- визначати оптимальні змінні величини кроків побудови виробу з урахуванням заданого допустимого значення відхилення формоутворення і щільності розподілу кутів нахилу нормалей граней тріангуляційної 3D-моделі виробу;
- оцінювати якість тріангуляції використаних 3D-моделей виробів шляхом кольорової візуалізації (підсистема представлена на рис. 5.9);
- оптимальним чином розміщувати вироби на робочій платформі установки пошарового вирощування за вибраним критерієм;
- виконувати порівняльний аналіз розподілів досліджених ознак за набором відомих статистичних критеріїв;
- зберігати проміжні або готові дані аналізу 3D-моделі у полігональному, пошаровому або воксельному виді у формати XLS, CSV та TSV для подальшого аналізу.

Формати даних CSV та TSV є необхідними для використання бібліотеки ML.NET (бібліотека інструментів глибинного навчання *Microsoft Cognitive Toolkit* [186]).

5.2. Відповідність структури розробленої системи вимогам щодо ефективної реалізації технологічної підготовки

Розробка структури програмного продукту, як складної системи, вимагає використання структурного підходу [284]. Сутність застосування структурного підходу до розробки системи технологічної підготовки полягає в її декомпозиції (розвитті) на деякі елементи (що містять функції): система розбивається на функціональні підсистеми, які в свою чергу діляться на

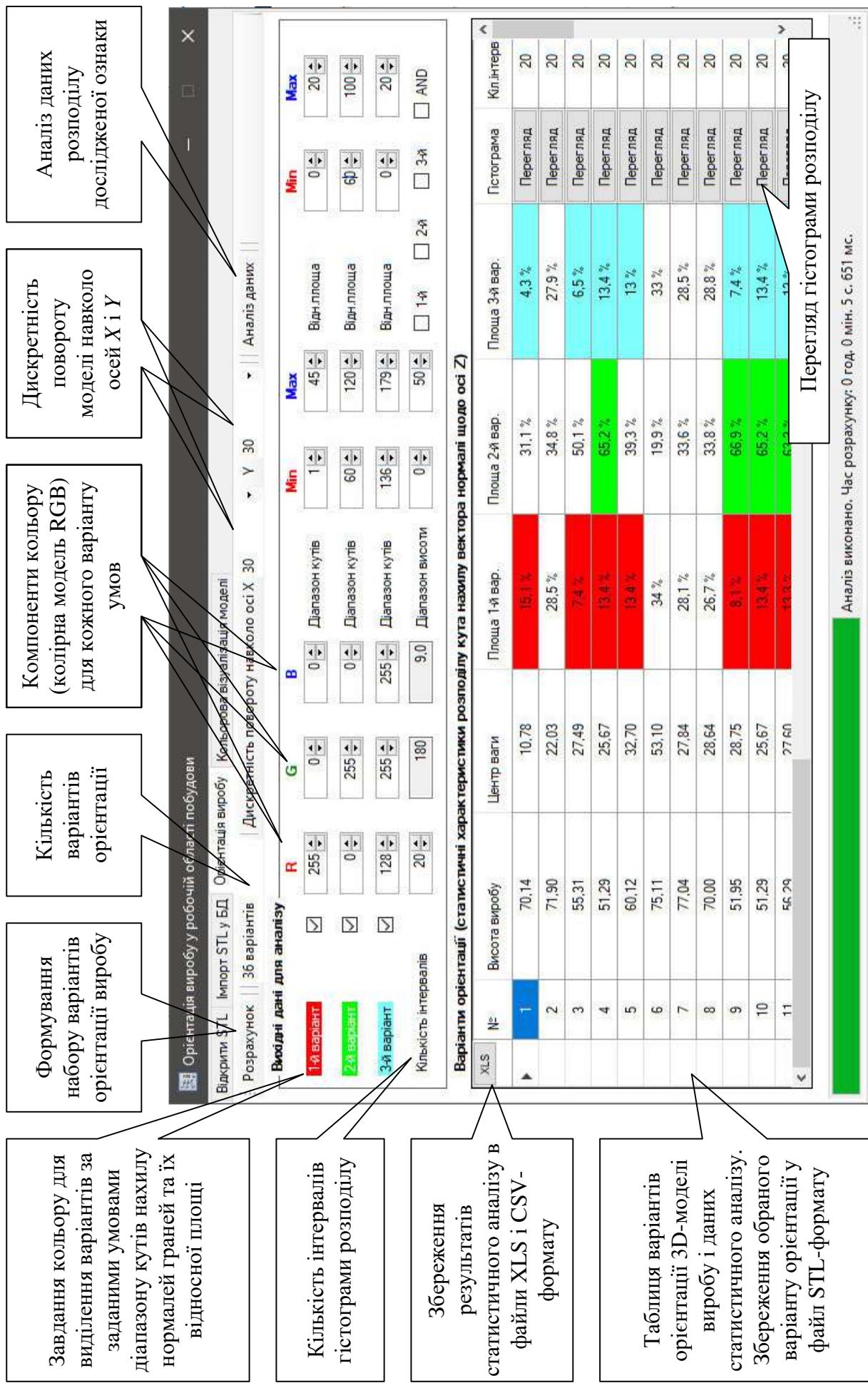


Рисунок 5.8 – Підсистема статистичного аналізу варіантів орієнтації виробу в робочій області пошарової побудови

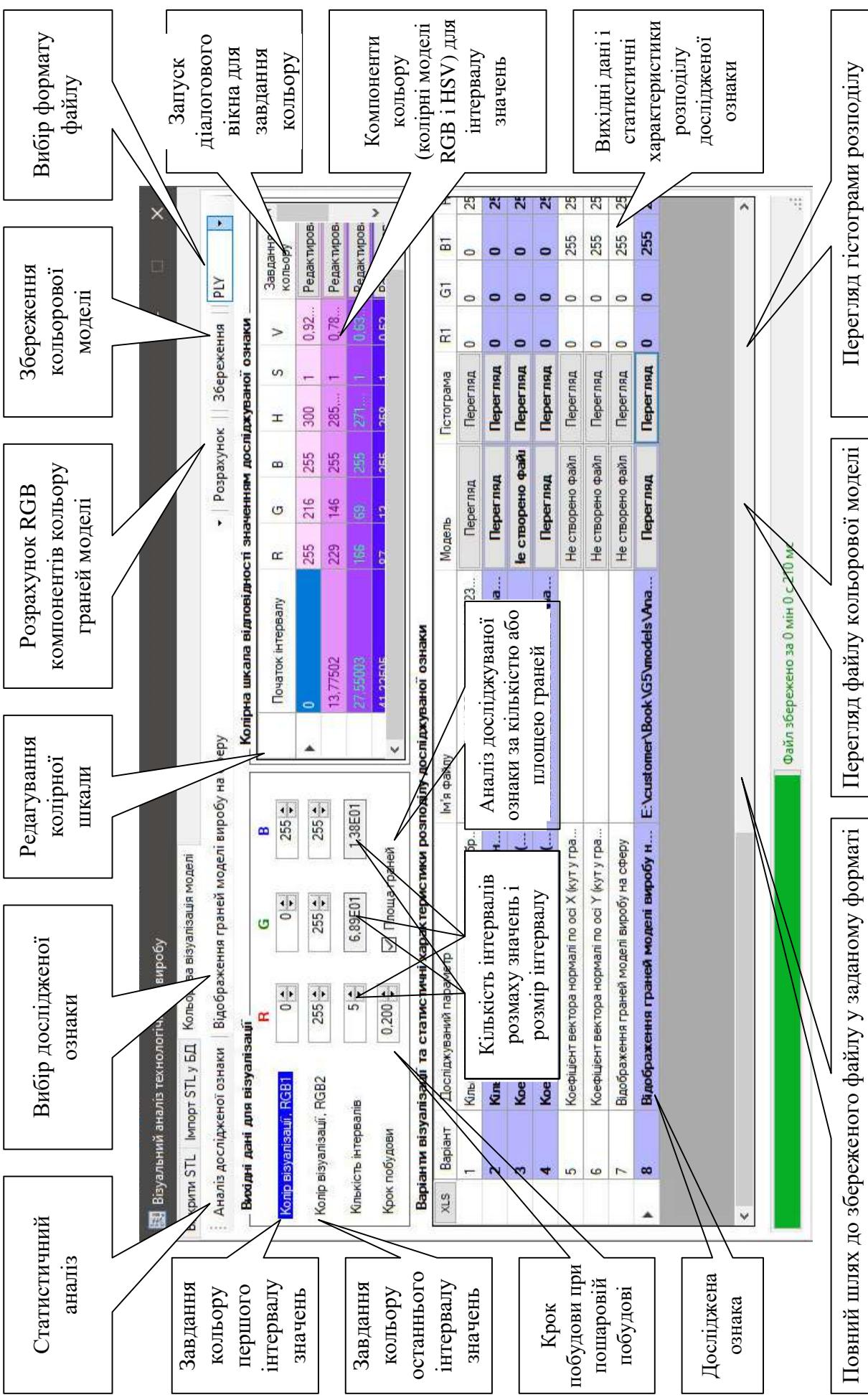


Рисунок 5.9 – Підсистема колірної візуалізації трансформаційної 3D-моделі виробу

підфункції, що підрозділяються на задачі. При цьому зберігається цілісне уявлення розробленої системи, в якій всі складові елементи інформаційно взаємопов'язані (шляхом передачі даних або їх спільногого використання).

Структуру розробленої системи з демонстрацією взаємозв'язку між її елементами (підсистемами) представлено на рис. 5.10.

Система технологічної підготовки створювалася з урахуванням відомих базових принципів з розробки програмного забезпечення. Основними такими принципами є наступні [285]:

- абстрагування (виділення істотних аспектів системи, опускаючи з розгляду несуттєві);
- формалізація (строгий методичний підхід до вирішення проблеми);
- несуперечливість (обґрунтованість та узгодженість елементів);
- структурування даних (дані повинні бути структурованими та ієрархічно організованими).
- повторюваність (неприпустимість наявності однакових блоків розробки);
- локальна оптимізація (оптимізація в межах рівня ієрархії);
- повнота (неприпустимість включення надлишкових елементів).

Розробка системи технологічної підготовки частково виконувалася згідно ISO/IEC 25010: 2011 (міжнародний стандарт для оцінки якості програмного продукту). Відповідно до цього стандарту слід забезпечувати такі якісні характеристики (критерії якості) програмного засобу:

- функціональні можливості (короткий опис дано в розд. 5.1);
- функціональну придатність (зручність використання, реалізована можливість обміну даними між програмами);
- правильність (коректність отриманих результатів);
- здатність до взаємодії;
- захищеність (розроблений інтерфейс не передбачає роботи з багатьма користувачами із захистом їх даних у розробленій системі);
- надійність (стійкість, точність виконання запропонованих функцій,

Основна екранна форма

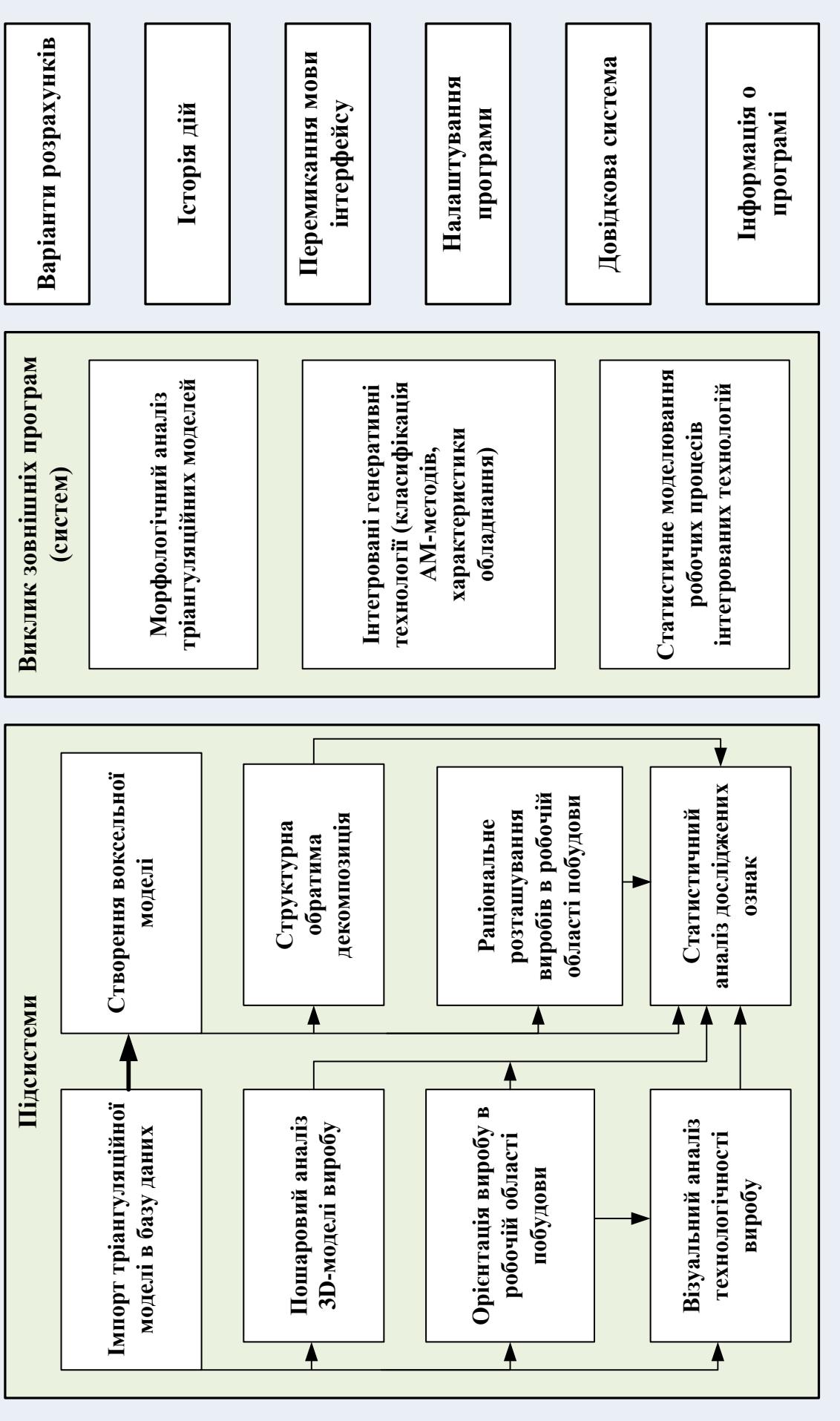


Рисунок 5.10 – Структура системи технологічної підготовки матеріалізації складних виробів адитивними методами

- можливість діагностики виникаючих помилок);
- ефективність (мінімізація вимог до ресурсів комп'ютерної техніки);
 - практичність (мінімізація трудомісткості підготовки вихідних даних, застосування системи та аналізу отриманих результатів);
 - забезпечення супровождження (доступність до зміни системи та її модифікації щодо усунення помилок);
 - мобільність (розроблена система не є багатоплатформною, а призначена тільки для використання в операційних системах Windows).

До уваги приймалася більшість критеріїв, перерахованих вище для оцінки якості розробленої системи технологічної підготовки. Передбачено довідкову систему і можливість послідовного та паралельного виконання задач, що дозволяють працювати без додаткових консультацій.

Забезпечення відповідності структури розробленої системи вимогам щодо структури і ефективного виконання технологічної підготовки (рис. 5.10) виконувалося за допомогою сформульованого комплексу умов, що містить таку систему подоб:

- технологічна подoba процесу підготовки матеріалізації 3D-моделі у виріб АМ-методами пошарової побудови (коректним формуванням полігональної, пошарової і воксельної 3D-моделей виробів);
- еволюційна подoba (дотриманням послідовності виконання завдань);
- геометрична подібність полігональної, пошарової і воксельної 3D-моделей виробу;
- статистична подібність з розподілу характеристик пошарової побудови і технологічних параметрів формоутворення;
- структурний шлях виконання задач з урахуванням їх взаємозв'язку і технологічних особливостей.

Концептуальна модель технологічної підготовки матеріалізації 3D-моделі адитивними методами побудована на базі системного об'єктно-орієнтованого підходу. В рамках такого підходу кожний виріб (початково заданий полігональною 3D-моделью) є об'єктом, який розглядається як екземпляр

певного класу з заданими значеннями властивостей, характерних для даного класу і може також містити методи (дії яких описуються функціями). Властивості розділено на три групи: вхідні - координати вершин і нормалей полігонів 3D-моделі, вихідні - координати точок контурів і положення перетинів для пошарової моделі, координати елементарних об'ємів воксельної моделі і характеристики матеріалізації, а також допоміжні (для зберігання проміжних даних статистичного аналізу).

В якості вирішення технологічної підготовки слід усвідомлювати 3D-модель робочого простору установки з розміщеними виробами, а також параметри пошарової побудови. Основним елементом такого рішення є пошарова 3D-модель одержуваного виробу або групи виробів. Пошарова модель – це об'єкт-контейнер, що включає список шарів. Кожен шар задається координатою розміщення по осі Z. При постійному кроці побудови шари рівномірно розподілені в просторі по осі Z. Параметрами об'єкту є висота побудови, координати точок контуру по осіах X, Y та стратегія його формування, що визначає траєкторію руху робочого органу або джерела енергії в процесі формоутворення.

Воксельна 3D-модель одержуваного виробу додатково формується для аналізу ефективності використання структурної оборотної декомпозиції і робочого простору установки пошарової побудови. Така 3D-модель – є об'єктом-контейнером, що включає в себе список (набір) вокселей, які задаються розмірами і координатами розміщення. При постійному об'ємі вокселя, вони рівномірно розподілені в просторі суцільного виробу. Параметри об'єкта – це об'єм і розміри вокселя та координати розміщення по осіах X, Y, Z.

Методика створення і дослідження варіанту екземпляру 3D-моделі робочого простору (рішення задач технологічної підготовки) включає наступні основні етапи: створення списку полігонів, що описує (тріангуляційну) 3D-модель виробу або групи виробів; аналіз тріангуляційної 3D-моделі для визначення рекомендацій щодо вирішення оптимізаційних задач; формування воксельної моделі; аналіз воксельної моделі для раціонального вирішення

задачі структурної оборотної декомпозиції; рішення задачі визначення раціональної орієнтації; розміщення групи виробів в робочому просторі АМ-установки (групи АМ- установок) пошарової побудови; статистичний аналіз досліджених характеристик елементів пошарової моделі; збереження пошарової або тріангуляційної 3D-моделі; визначення раціонального варіанту матеріалізації виробів; візуалізація та документування результатів розрахунків.

Розглянемо особливості опису даних тріангуляційних 3D-моделей виробів в форматі STL і питання їх переходу в розроблену систему.

5.3 Перехід від тріангуляційної 3D-моделі виробу до бази даних, що використовується в системі технологічної підготовки

Вихідну інформацію про геометрію виробу представлено в файлах STL-формату. STL-файли можуть бути двох видів формату - текстовому (*ASCII*) або двоїчному (*Binary*) [286]. В CAD-системах обов'язково є можливість переходу 3D-моделі виробу (або групи виробів) з внутрішнього формату в STL [287]. В CAD-системах пропонуються суттєво різні комплекси параметрів. В їх число, окрім допустимої похибки тріангуляції, також можуть входити й інші обмеження на розміри або співвідношення ребер трикутних полігонів.

У STL-файлі кожна трикутна грань (полігон) обов'язково описується такими даними: координатами X , Y , Z вершин і направляючого вектору нормалі поверхні. Коректний опис поверхні означає, що суміжні трикутники мають дві загальні вершини (тобто загальне ребро). Послідовність вершин полігону формується з урахуванням правої системи координат. Вектор нормалі направлений від поверхні тіла. Обхід вершин проводиться проти годинникової стрілки, якщо дивитися з кінця вектору нормалі на грань. Перша вершина вибирається довільно.

STL-файл текстового типу містить структуровану (на базі ключових слів: *solid*, *facet*, *normal*, *outer loop*, *vertex*, *endloop*, *endfacet*, *endsolid*) інформацію про трикутні грані, тобто координати нормальноговектору N_x , N_y , N_z і три вершини v_x , v_y , v_z . При цьому дані щодо нормальноговектору є надлишковими (деякі

CAD-системи роблять запис нулів), так як вони перераховуються за координатами трьох вершин (2.7) [206]. Використовуючи ключові слова як розмітку для зчитування даних, вони вносилися до бази даних у вигляді списку *List<base_STL>*.

Бінарний (Binary) STL-файл має деякі відмінності [216]: 84 байтів відводиться для опису заголовку, що містить необов'язкову інформацію (80 байт - символний тип даних для коментаря, а 4 - ціле число без знаку для загальної кількості граней n_{tr}), і по 50 байт дляожної грані. Стосовно до даного типу файлу, їхній розмір визначається за такою залежністю $84+50 \cdot n_{tr}$. Аналогічно з текстовим форматом грань описується координатами N_x , N_y , N_z і v_x , v_y , v_z . В даному випадку розмітка даних прораховується з урахуванням порядкового номера байту в потоці зчитування бінарного файлу знаючи, що на кожне значення (число з плаваючою комою) виділено 4-и байти ($4 \cdot 12 = 48$ байт) і на роздільник між гранями – ще два резервних байти (може записуватися інформація про колір поточної грані).

Тріангуляційні 3D-моделі можуть мати такі дефекти (помилки тріангуляції): розриви, поверхні, що самопересікаються, вироджені або ті, що мають загальну сторону більш ніж з одним сусіднім полігоном, неправильна орієнтація (розгорнутий полігон). Тому виконується попередня перевірка (верифікація) на подібні дефекти в програмному забезпеченні (опис методики в розд. 2), розробленому на кафедрі "Інтегровані технології машинобудування" НТУ "ХПІ" [198]. Верифікація дозволяє не допустити некоректне формування контурів перетинів на етапі пошарового розсічення 3D-моделі.

5.4 Перехід від тріангуляційної до пошарової моделі виробу

Перехід від вихідної тріангуляційної 3D-моделі виробу до набору шарів виконувався за процедурою, розробленою з урахуванням існуючих робіт [281, 282], яка реалізує стратегії з постійним та змінним кроком побудови.

5.4.1 Стратегія пошарового розсічення

При виконанні процедури пошарового розсічення 3D-моделі на першому

етапі створюється список координат шарів Z_{Ci} . На іншому - визначення контурів для кожного шару. Список координат Z_{Ci} формувався за наступною залежністю:

$$Z_{Ci} = Z_{Ci} + h_i, \quad Z_{Ci} \in [Z_{min}, Z_{max}), \quad (5.1)$$

де Z_{min} , Z_{max} - мінімальна та максимальна координата вершин тріангуляційної 3D-моделі;

h_i - крок побудови, який для стратегії з постійним кроком $h_i = const$, а для адаптивної стратегії вибирається у заданому інтервалі $h_i \in [h_{min}, h_{max}]$;

h_{min} , h_{max} – мінімальне і максимальне значення допустимого інтервалу кроків побудови для вираного АМ-обладнання і матеріалу виробу.

Стосовно до стратегії з постійним кроком побудови можливо заздалегідь визначити кількість перетинів (шарів) N_L , яка залежить від кроку побудови h_L і граничних значень координат вершин тріангуляційної 3D-моделі. Тому дана кількість у разі постійного кроку побудови N_L визначається наступною залежністю:

$$N_L = \begin{cases} \lceil (Z_{max} - Z_{min})/h_L \rceil, & \text{якщо } (Z_{max} - Z_{min})/h_L \in \\ & . \\ \lceil (Z_{max} - Z_{min})/h_L \rceil + 1, & \text{інакше} \end{cases} \quad (5.2)$$

За методами адаптивного пошарового розділення 3D-моделі, як правило, крок побудови h_i задається з урахуванням заданого обмеження Δ_S щодо відхилення від правильної форми поверхонь (гранично допустимої похибки формоутворення) [282]:

$$h_i = \Delta_S / \cos \Phi_{NZ min}, \quad (5.3)$$

де $\Phi_{NZ min}$ – мінімальний кут нахилу щодо осі Z нормалі граней в i -му шарі.

Рішення задачі адаптивного пошарового розділення 3D-моделі складного виробу включає в себе наступні проблеми:

- необхідність врахувати всю поверхню моделі між площинами, що визначають поточний і наступний шар;
- нерівномірний розподіл площі цієї поверхні за кутами Φ_{NZ} .

Перша проблема виникає через первісну невизначеність поточного кроку побудови h_i . У запропонованому методі адаптивного розділення дана проблема вирішується початковим розсіченням 3D-моделі з кроком, рівним дискретності завдання розташування шару Z_i від поточної площини до площини, що визначається найбільшою допустимою величиною h_{max} . Друга проблема виникає у зв'язку з матеріалізацією 3D-моделей складних за геометрією промислових виробів.

Наслідком обох проблем є необґрунтоване завдання кроку побудови за неповною інформацією щодо утвореної поверхні поточним шаром. У зв'язку з існуючим нерівномірним розподілом площі поверхні за кутами Φ_{NZ} для складних виробів, крок побудови h_i , що задається за відомою залежністю (5.3), є заниженим. На практиці враховувати поверхні з нормалями, що мають гранично мінімальне відхилення від осі Z (напрямку побудови), може бути надмірним у тих випадках, коли їх відносна площа менша від загальної на 5÷20 %. Таку обставину можна врахувати при визначенні $\Phi_{NZ min}$ шляхом усічення щільності розподілу Φ_{NZ} в поточному шарі за відносною площею на допустиму величину. Допустима величина усічення повинна визначатися за своїм впливом на підсумкові показники якості і точності поверхні виробу. Таке усічення дозволить збільшити кут i , відповідно, з урахуванням залежності (5.3), збільшити допустиму величину кроків побудови h_i . В результаті з'являється можливість при забезпеченні заданого граничного відхилення від правильної форми поверхні мінімізувати кількість шарів і час побудови.

Приклад можливого усічення розподілу величин Φ_{NZ} , одержуваних в площині шару, показано на рис. 5.11. Наведений приклад на рис. 5.11 а відноситься до небажаних для виконання усічення розподілу величини Φ_{NZ} тому, що не дозволяє суттєво змінити граничне значення $\Phi_{NZ min}$.

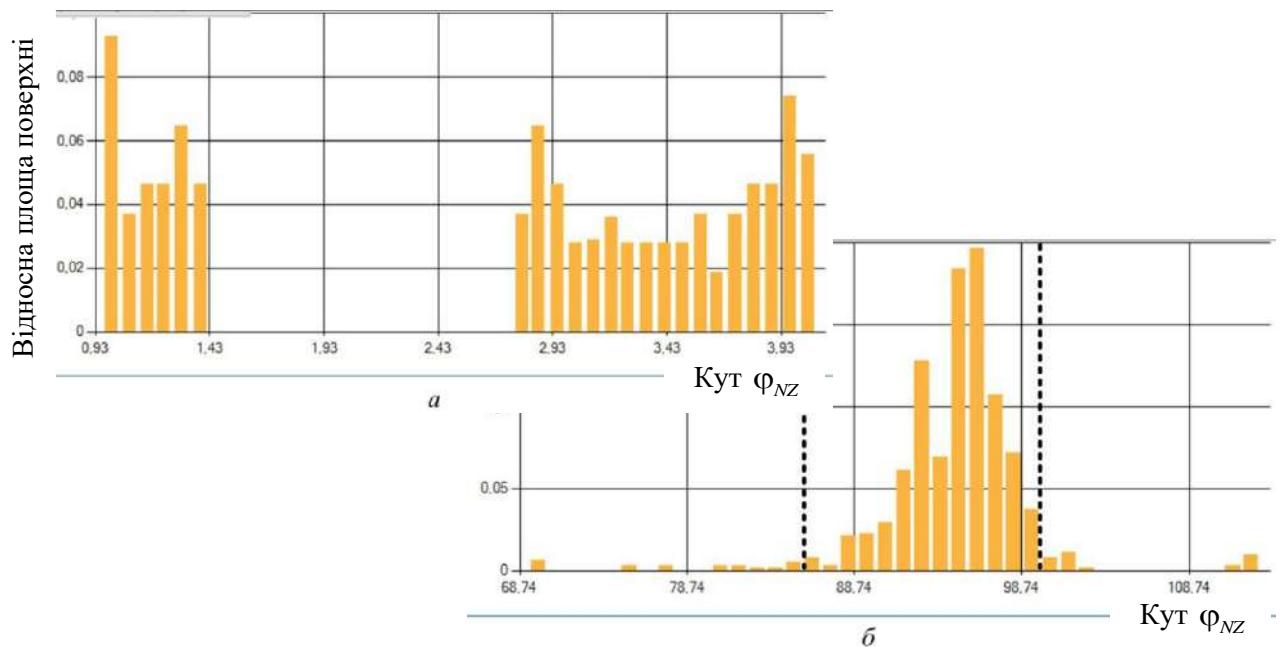


Рисунок 5.11 – Приклади гістограм щільності розподілу величини кута Φ_{NZ} у шарах побудови

Приклад розподілу величини Φ_{NZ} з більш ефективним впливом усічення на $\Phi_{NZ min}$ наведено на рис. 5.11 б. При усіченні розподілу на 5 % за площею вдається зменшити $\Phi_{NZ min}$ (інтервал значень Φ_{NZ} можливо зменшити більше ніж у 3 рази за умови усічення 5 % площині, тобто при ймовірності знаходження за межами довірчого інтервалу – 0,05). Такий вид розподілу Φ_{NZ} відноситься до найбільш поширених серед шарів побудови як для складних за геометрією виробів.

Запропонована адаптивна стратегія пошарового розділення 3D-моделі виконується за схемою, представленою на рис. 5.12.

Шар, як об'єкт, містить координати вершин контуру (2D перетину), що утворюється шляхом перетину січної площини (заданої координатою розміщення поточного шару Z_i) з тріангуляційною 3D-моделью.

5.4.2 Аналіз контурів перетинів

Січна площа i -го шару при перетині з трикутними полігонами утворює множину вершин $\{v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,m}\}$, а отже – послідовну множину ребер $\{\{v_{i,1}, v_{i,2}\}, \{v_{i,2}, v_{i,3}\}, \dots, \{v_{i,m}, v_{i,1}\}\}$. Контур перетину при виконанні умови збігу кінцевої і початкової вершин є замкнутим.

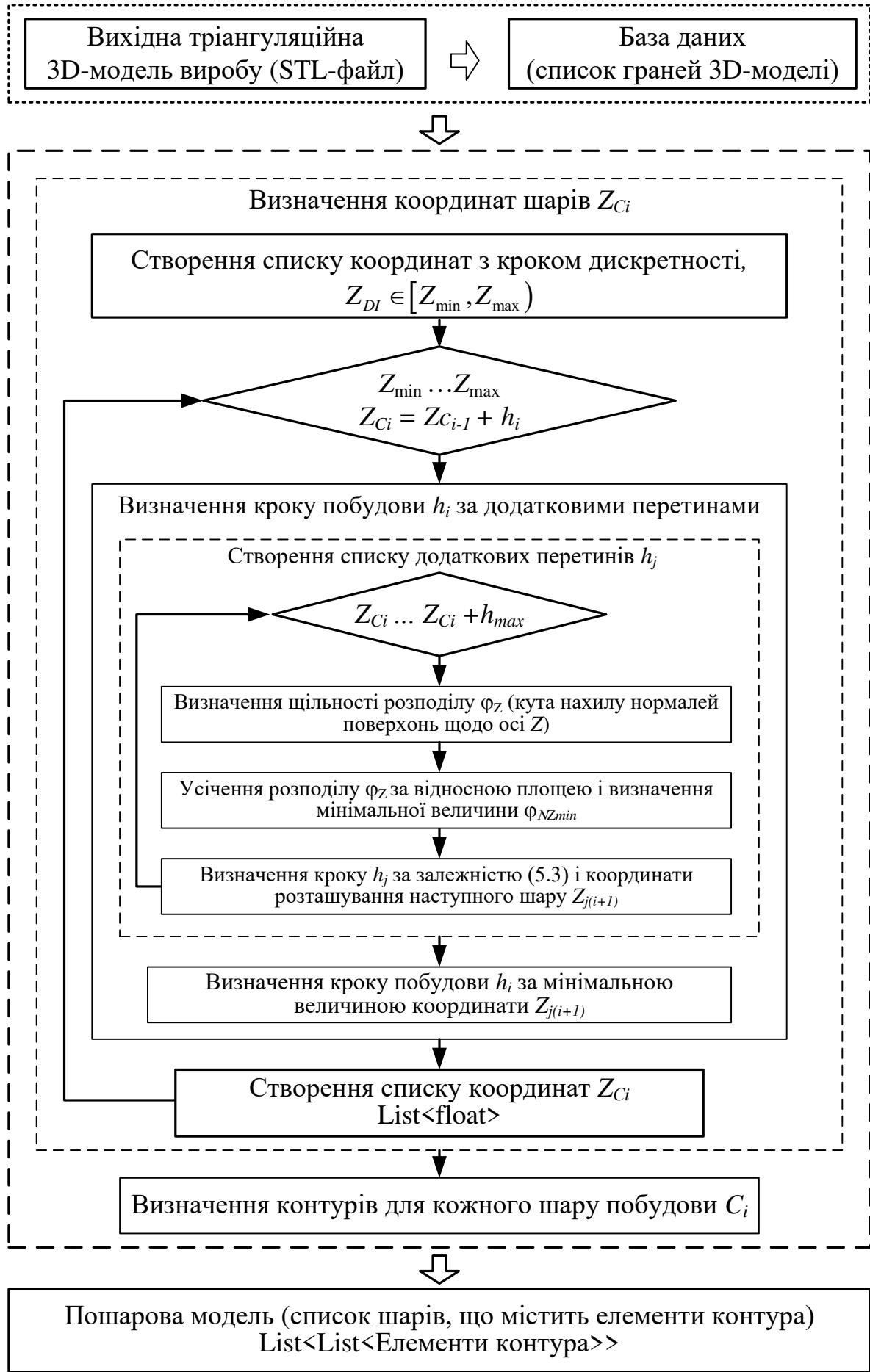


Рисунок 5.12 – Схема адаптивного пошарового розсічення 3D-моделі

При визначенні вершин контуру i -го шару слід розглядати тільки такі полігони, які перетинаються з січною площинами. Умовою перетину полігону січною площинами Z_i є наступна:

$$\begin{aligned} \left\{ p_j.z_1, p_j.z_2, p_j.z_3 \right\}_{\min} \leq Z_i \leq \left\{ p_j.z_1, p_j.z_2, p_j.z_3 \right\}_{\max}, \\ \text{якщо } \left\{ p_j.z_1, p_j.z_2, p_j.z_3 \right\}_{\min} \neq \left\{ p_j.z_1, p_j.z_2, p_j.z_3 \right\}_{\max} \end{aligned}, \quad (5.4)$$

де $p_j.z_1, p_j.z_2, p_j.z_3$ - координати вершин j -го полігону по осі Z .

Представлена умова перетину полігону (5.4) виключає такі, що лежать в січній площині та, відповідно, паралельні площині XY .

Координати точок відрізка перетину трикутних граней із січною площинами шару визначаються за рівняннями прямої і площини у просторі [206]. Точки перетину з однією гранню формують k -е ребро контуру. Множина ребер формує контур (або контури) i -го перетину. Для суміжних ребер координати їх точок збігаються $e_k.v_{2,x} = e_{k+1}.v_{1,x} \wedge e_k.v_{2,y} = e_{k+1}.v_{1,y} \Rightarrow e_k.v_2 = e_{k+1}.v_1$. За умови наявності для всіх ребер двох суміжних то такий контур є замкнутим:

$$\forall e_k, \left\{ e_k \mid e_{k-1}.v_2 \neq e_k.v_1 \vee e_k.v_2 \neq e_{k+1}.v_1 \right\} = \emptyset.$$

У разі утворення множини контурів за своїм взаємним розташуванням вони можуть бути як зовнішніми, так і внутрішніми. Інформація щодо відносного розташування контурів необхідна для коректного формоутворення шару.

Виділення внутрішніх і зовнішніх контурів перетину виконувалося шляхом визначення їх площі як для багатокутників. Площа контуру (плаского багатокутника) в i -му перетині визначається за формулою площі Гауса (алгоритм шнурування) [288]:

$$S_C = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m (e_k.v_{2,x} + e_{k+1}.v_{2,x})(e_k.v_{2,y} - e_{k+1}.v_{2,y}), \quad (5.5)$$

де m – кількість вершин багатокутника (ребер контуру).

Вершини з координатами $(e_m.v_{2,x}, e_m.v_{2,y})$ і $(e_1.v_{1,x}, e_1.v_{1,y})$ в залежності

від (5.5) рівню для замкнутого (коректного) контуру. Площа за залежністю (5.5) може бути позитивною або негативною, таким чином визначається вид контуру: позитивна величина – зовнішній контур, негативна - внутрішній.

Однією з проблем матеріалізації 3D-моделі пошаровою побудовою є мінливість характеристик перетинів в разі складної геометрії отримуваного виробу. Оцінку складності пошарового виготовлення, як правило, засновано на аналізі за площею шарів [91]. Площа перерізу визначається як сума значень площ всіх контурів (плоских багатокутників):

$$S_i = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M (e_k \cdot v_2 \cdot x + e_{k+1} \cdot v_2 \cdot x)(e_k \cdot v_2 \cdot y - e_{k+1} \cdot v_2 \cdot y), \quad (5.6)$$

де M – кількість вершин (ребер) всіх контурів i -го шару.

Стосовно до 3D-моделей виробів зі складною геометрією аналіз однієї характеристики, а саме площі перерізів, не забезпечує достатньої інформативності щодо потенційних проблем пошарової побудови. Додаткову інформацію про множину перетинів може надати зміщення барицентра за шарами та кутами між суміжними ребрами контуру.

Барицентром контурів перетину (коректного замкнутого багатокутника) є точка $b_i(G_x, G_y)$ [289]:

$$G_x = \frac{1}{6S_i} \sum_{k=1}^M (e_k \cdot v_2 \cdot x + e_{k+1} \cdot v_2 \cdot x) |(e_k \cdot v_2 \cdot x \times e_{k+1} \cdot v_2 \cdot y - e_{k+1} \cdot v_2 \cdot x \times e_k \cdot v_2 \cdot y)|, \quad (5.7)$$

$$G_y = \frac{1}{6S_i} \sum_{k=1}^M (e_k \cdot v_2 \cdot y + e_{k+1} \cdot v_2 \cdot y) |(e_k \cdot v_2 \cdot x \times e_{k+1} \cdot v_2 \cdot y - e_{k+1} \cdot v_2 \cdot x \times e_k \cdot v_2 \cdot y)|. \quad (5.8)$$

У формулах (5.5)-(5.8) передбачається, що вершини попередньо пронумеровані уздовж периметру контура (дана умова в більшості випадків дотримується завдяки особливостям тріангуляції 3D-моделі, тобто послідовним розміщенням з урахуванням суміжності її граней).

Кут (при вершині) між суміжними ребрами контуру слід визначати в такий спосіб [206]:

$$\alpha_1 = \arccos \left(\frac{\left((e_k.v_2.x - e_k.v_1.x)(e_{k+1}.v_2.x - e_k.v_1.x) + (e_k.v_2.y - e_k.v_1.y)(e_{k+1}.v_2.y - e_k.v_1.y) \right)}{\sqrt{\left((e_k.v_2.x - e_k.v_1.x)^2 + (e_k.v_2.y - e_k.v_1.y)^2 \right) \times \sqrt{\left((e_{k+1}.v_2.x - e_k.v_1.x)^2 + (e_{k+1}.v_2.y - e_k.v_1.y)^2 \right)}}} \right) . \quad (5.9)$$

Додаткові характеристики контуру шару дозволяють науково обґрунтовано виявляти взаємозв'язок між геометрією одержаного виробу та проблемними ситуаціями, які виникають при пошаровій побудові.

5.4.3 Пошарова візуалізація

Візуальний аналіз контурів перетинів реалізовано в розробленій системі технологічної підготовки з метою розширення можливостей дослідження АМ-процесів. В тому числі можливість візуально відслідковувати вид контуру, що дозволить запобігти виникненню помилок при вивченні нових досліджуваних ознак.

Візуалізацію контурів перетинів (2D-зображень) на екранній формі підсистеми аналізу пошарової моделі (рис. 5.6) реалізовано з використанням класів *Graphics* (надає методи рисування на елементі відображення) і *Pen* (використовується для рисування ліній і кривих) з простору імен *System.Drawing* (забезпечує доступ до базових функціональних можливостей графічного інтерфейсу GDI +). У лівій частині екранної форми розташовується список шарів (з інформацією про їх координати розміщення та даними статистичного аналізу досліджених характеристик), при виборі відповідного шару виконується його відображення на панелі візуалізації.

Принциповою особливістю відображення перетинів у підсистемі пошарового аналізу (у порівнянні з відомими програмами, що дозволяють одержувати пошарову модель) є можливість порівняльного аналізу між обраними шарами (одночасне подання контурів різних шарів з накладенням) і відокремлюванням внутрішніх і зовнішніх контурів перетину (завдяки виділенню різними кольорами).

У наступному розділі розглянуто питання створення вокセルної 3D-моделі на основі вихідної тріангуляційної. Вокセルна модель має переваги з аналізу просторового розподілу матеріалу виробу, що є необхідним на етапі виявлення підходів щодо підвищення ефективності використання робочого простору АМ-установки.

5.5 Перехід від тріангуляційної до вокセルної 3D-моделі

Рішення технологічних задач підготовки адитивного виробництва в багатьох роботах виконується з використанням вокセルної моделі виробу [118, 247, 251]. У даній роботі запропоновано вокセルну модель використовувати для аналізу розподілу матеріалу виробу в робочому просторі установки.

Вокセルна модель складається з упорядкованого набору вокселей, що представляють собою елементи об'єму (в роботі використовувалися воксели з постійним об'ємом) з заданим розташуванням в просторі (координати $x_{V(i)}$, $y_{V(i)}$, $z_{V(i)}$). Тому вокセルна модель являє собою множину елементарних об'ємів $V = \{v[0], v[1], \dots v[n_v]\} = \{v[i]\}$. Подібне визначення добре узгоджується з поданням об'єктів класів і структур типів даних в програмуванні. На відміну від тріангуляційних моделей, вокセルні моделі пропонують більш простий і ефективний спосіб обробки даних.

Вокセルна модель створювалася на основі алгоритму "пропуск простору" (*Space Leaping* [290]), який має деяку відмінність від простого алгоритму "трасування променів". Схему формування вокセルної моделі матеріалу і вільного простору на основі тріангуляційної моделі виробу представлена на рис. 5.13.

У відповідності зі схемою створення вокセルної моделі шляхом предобробки (визначення координат меж між матеріалом і вільним простором) проводиться виділення і об'єднання порожніх та заповнених ділянок простору, і під час трасування променів таких ділянок автоматично формуються діапазони вокселей (матеріалу або вільного простору).

У наступному підрозділі представлено розроблену підсистему для аналізу

Вибір тріангуляційної 3D-моделі виробу,
завдання розмірів вокселей

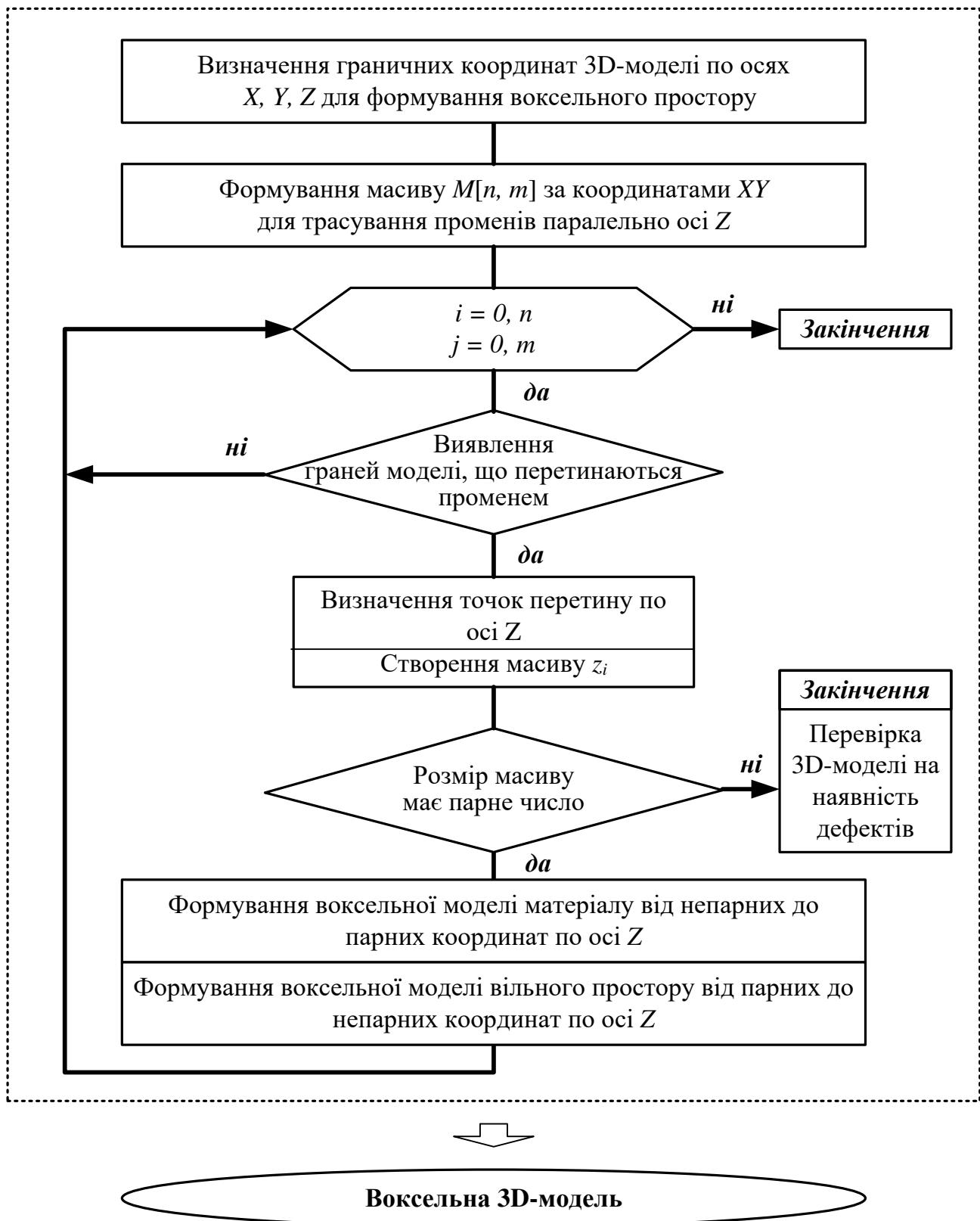


Рисунок 5.13 - Схема створення вокセルної моделі на основі
тріангуляційної 3D-моделі виробу

воксельних моделей та розглянуто особливості статистичного аналізу просторового розподілу вокселей у робочому просторі установки.

5.6 Статистичний аналіз воксельної 3D-моделі виробу

Що стосується задачі аналізу просторового розподілу матеріалу виробу, найбільш придатною є воксельна модель. Воксельна модель досить часто застосовується при вирішенні ряду задач технологічної підготовки АМ-процесів [92, 291]. Перевага воксельної моделі полягає у використанні більш простих алгоритмів для статистичного аналізу розподілу вокселей (елементарних частинок об'єму / матеріалу виробу).

Дослідження виконувалось з використанням підсистеми створення і статистичного аналізу воксельної 3D-моделі виробу. Ця підсистема входить до системи технологічної підготовки матеріалізації складних виробів адитивними методами.

Екранні форми розробленої підсистеми створення і аналізу воксельної 3D-моделі представлено на рис. 5.4, 5.5 и 5.14.

Розроблена підсистема надає користувачеві наступні основні можливості завдання параметрів та режимів роботи з наступною візуалізацією результатів:

- створення воксельної 3D-моделі виробу на основі полігональної (STL-файлу) з урахуванням розмірів вокселей Δ_x , Δ_y , Δ_z (розд. 5.5, екранну форму представлено на рис. 5.4);
- збереження воксельної моделі в файл ASC-формату для аналізу у сторонніх програмах (CAD-системах);
- статистичний аналіз і побудова гістограм розподілу вокселей 3D-моделі по осіах X , Y , Z (рис. 5.5) і по підпросторам робочого простору (рис. 5.14);
- визначення основних статистичних характеристик (12 параметрів виводяться на екранну форму, показану на рис. 5.5);
- візуалізація результатів аналізу у вигляді щільності або інтегральної функції ймовірності.

Можливість виведення статистичних характеристик та гістограм розподілу кількості вокセルей по осях X , Y , Z (рис. 5.5) дозволяє кількісно і візуально оцінювати особливості розподілу матеріалу.



Рисунок 5.14 - Візуалізація розподілу вокселей за підпросторами

Розгляд робочого простору у вигляді сукупності підпросторів дає можливість оцінювати просторовий розподіл матеріалу. Передбачений статистичний аналіз з візуалізацією розподілу вокселей за підпросторами (рис. 5.14) дозволяє кількісно оцінювати їх наповненість матеріалом виробу. Реалізація такого підходу створює основу для обґрунтованого застосування декомпозиції, а також порівняльного аналізу підходів щодо підвищення ефективності використання робочого простору АМ- установок.

5.7 Статистичний аналіз варіантів орієнтації виробу

У розробленій системі передбачено підсистему, орієнтовану на вирішення задачі статистичного аналізу досліджуваних ознак для набору варіантів

орієнтації 3D-моделі виробу у робочому просторі.

Екранну форму підсистеми статистичного аналізу варіантів орієнтації виробу представлено на рис. 5.8. Дано система дозволяє визначати раціональні варіанти (множину варіантів повороту навколо осей власної системи координат) орієнтації виробу на основі результатів статистичного аналізу розподілу величин досліджуваних ознак (кута нахилу нормалей граней φ_{NZ} щодо вектору напрямку побудови за їх відносною площею S_{Rel} та висотою побудови H_B).

Розроблена підсистема надає користувачеві наступні основні можливості завдання параметрів і режимів роботи:

- формування множини варіантів орієнтації виробу за заданою дискретністю зміни кутів повороту 3D-моделі навколо осей X , Y ;
- статистичний аналіз (визначення 12-и статистичних характеристик) і побудова гістограм розподілу дослідженої ознаки за площею трикутних граней;
- запис результатів розрахунків в загальну таблицю для порівняльного аналізу варіантів;
- збереження результатів статистичного аналізу у файли XLS та CSV-формату для подальшої роботи з ними в сторонньому програмному забезпеченні;
- візуалізація результатів аналізу у вигляді щільності або інтегральної функції ймовірності.

Аналізом набору варіантів передбачено дві досліджувані ознаки тріангуляційної 3D-моделі виробу – це множина кутів між вектором напрямку побудови та нормалями граней $\{\varphi_{NZ}\}$ та висота виробу h_Z .

Кут φ_{NZ} розраховується за коефіцієнтами одиничного вектору нормалі N_x , N_y , N_z . Величини коефіцієнтів N_x , N_y , N_z , як правило, представлено у вихідному STL-файлі. В іншому випадку дані коефіцієнти розраховуються за відомими залежностями (2.7) [206].

Формування варіанту орієнтації здійснюється перетворенням 3D-моделі з розрахунком координат вершин і векторів нормалей трикутних граней.

Визначення координат вершин виконується з урахуванням рівняння повороту системи координат [206], а також виконанням послідовних поворотів навколо координатних осей X і Y за залежностями, представленими в розд. 4.6.

Статистичний аналіз тестових тріангуляційних моделей виробів з розподілу величини φ_{NZ} дозволив виявити наступне:

- пропоновані підходи в роботах [138, 265] за визначенням раціональної орієнтації виробу мають обмежене застосування лише для моделей виробів з нескладною геометрією;
- раціональна орієнтація виробу може задаватися в досить широкій області значень кутів φ_X , φ_Y повороту моделі, що представляє інтерес для уточнення даних кутів за додатковими критеріями оптимізації або в наступних задачах технологічної підготовки.

З урахуванням отриманих результатів аналізу щільності розподілу величини φ_{NZ} для набору моделей виробів різного ступеня складності запропоновано вибирати орієнтацію, яка дозволяє забезпечувати мінімальну площину поверхні виробу з найбільшою величиною відхилення форми.

Практика використання адитивних технологій показує збільшенні відхилення форми для поверхонь з невеликим кутом нахилу їх нормалі щодо осі Z . Тому становить інтерес визначення площі граней S_i з нахилом нормалей φ_{NZ} , які задовольняють наступній умові:

$$\varphi_{NZ} \in (0^\circ, \varphi_{\max}) \cup \varphi_{NZ} \in (180^\circ - \varphi_{\max}, 180^\circ), \quad (5.10)$$

де φ_{\max} – максимальне значення кута, обмеженого допустимою похибкою

$$\cos \varphi_{\max} = \frac{\Delta_{S_{\max}}}{h_{\min}} \quad (\text{якщо } \Delta_{S_{\max}} > h_{\min} \cdot \cos(45^\circ) \text{ тоді} \\ \varphi_{\max} \in [30^\circ, 45^\circ]);$$

$\Delta_{S_{\max}}$ – допустима похибка формоутворення;

h_{\min} – мінімальна величина кроку побудови, обмежена технологічними можливостями АМ-установки або необхідними фізико-механічними

властивостями виробу.

Внаслідок цього орієнтація виробу повинна здійснюватися при мінімізації наступної функції:

$$F = \min_{1 \leq j \leq m} \left(\sum_{i=1}^n S_i \right), \quad (5.11)$$

де S_i – площа i -ї грані тріангуляційної 3D-моделі, що відповідає умові (5.10);

n – кількість граней, що відповідають умові (5.10);

m – загальна кількість варіантів орієнтації виробу.

На рис. 5.15 представлено алгоритм визначення кутів повороту тріангуляційної моделі виробу, що було реалізовано в розробленій підсистемі.

Запропонований критерій (5.11) для вибору оптимальної орієнтації виробу дозволяє для складних виробів мінімізувати площу поверхонь з найбільшими відхиленнями формоутворення, тобто мають найбільш виражений ефект «ступінчастості» поверхні.

Тестові тріангуляційні 3D-моделі виробів з результатами статистичного аналізу (гістограми розподілу величин кута нахилу нормалей граней щодо вектору напрямку побудови φ_{NZ} за відносною площею граней) представлені на рис. 5.16. Модель кришки (рис. 5.16 а) складається з 146 946 трикутних граней (загальна площа моделі $S_{Face} = 324,3$ тис. мм^2). У вихідному положенні 3D-моделі відносна площа трикутних граней, які відповідають умові (5.10) для $\varphi_{\max} = 30^\circ$ – 26,7%, для $\varphi_{\max} = 45^\circ$ – 29,3%. На рис. 5.16 а представлена гістограма розподілу величин кута φ_{NZ} для оптимального варіанту орієнтації, отриманого з використанням запропонованого алгоритму (рис. 5.15). Оптимальний варіант отримано при повороті вихідної 3D-моделі на кут 90° навколо осі X . В цьому випадку відносна площа трикутних граней з кутом $\varphi_{NZ} \in (0^\circ, \varphi_{\max})$ становить для $\varphi_{\max} = 30^\circ$ – 11,5%, для $\varphi_{\max} = 45^\circ$ – 16,2%. Таким чином орієнтація моделі з використанням функції (5.11) дозволяє зменшити площу поверхні з найбільш вираженим ефектом "ступінчастості" приблизно в 2,3 рази (при $\varphi_{\max} = 30^\circ$) у порівнянні з початковим положенням.



Рисунок 5.15 - Алгоритм визначення кутів повороту 3D-моделі виробу для його раціональної орієнтації у робочому просторі АМ- установки

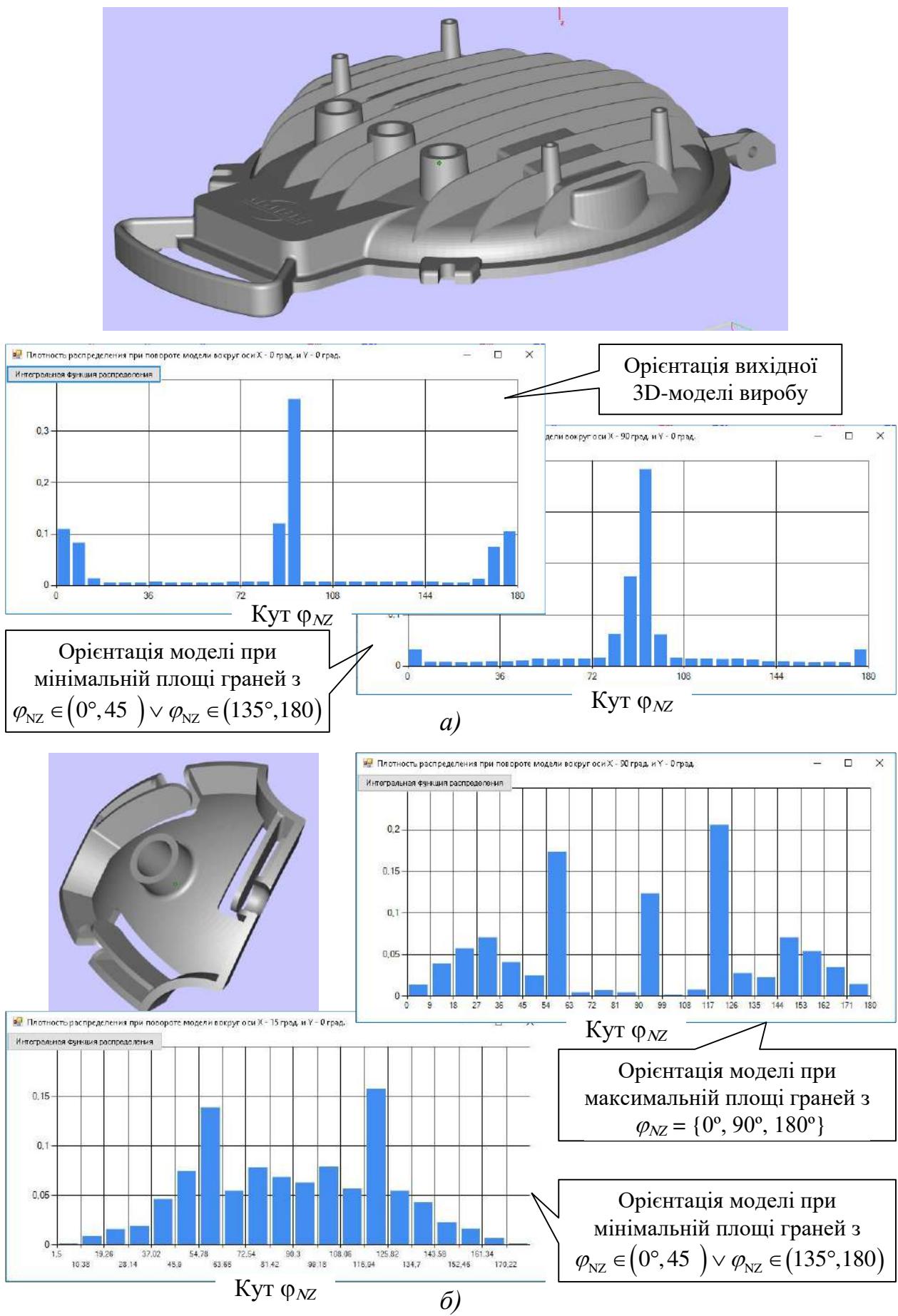


Рисунок 5.16 – Тестові 3D-моделі виробів і гістограми розподілу величин кута між нормалями трикутних граней 3D-моделі та вектором напрямку побудови φ_{NZ} за їх площею

Підхід до визначення раціональної орієнтації виробу, описаний в роботі [125], не в усіх випадках дозволяє визначити оптимальні варіанти орієнтації, що забезпечують зниження максимальної похибки побудови. У даній роботі оптимізація кутів повороту 3D-моделі виконується шляхом максимізації площин поверхні з мінімальною похибкою, тобто з нормальними граней $\varphi_{NZ} = \{0^\circ, 90^\circ, 180^\circ\}$. Приклад тестової моделі виробу (кількість граней $N_{Face} = 32\,668$ шт., площа $S_{Face} = 4,5$ тис. мм^2), наведений на рис. 5.16 б, підтверджує обмеження даного критерію оптимізації. Порівняльний аналіз щільності розподілу відносної площині граней (рис. 5.16 б) для орієнтації, визначененої з використанням цільової функції, запропонованої в роботі [125] і функції (5.11), показує суттєві відмінності. Орієнтація 3D-моделі, отримана за функцією (5.11), дозволяє зменшити площину поверхні, трикутні грані якої мають кут $\varphi_{NZ} \in (0^\circ, 30^\circ)$ більше ніж в 4-и рази. На рис. 5.17 представлено приклад моделі виробу з простою геометрією ($N_{Face} = 1\,624$ шт., $S_{Face} = 11,4$ тис. мм^2). Стосовно даної моделі збіглася орієнтація виробу, обрана за двома розглянутим цільовими функціями. Обидва варіанти для моделей з нескладною геометрією цілком вірогідно визначають оптимальний варіант орієнтації. Для моделей з більш складною геометрією (наприклад, як для моделей на рис. 5.17) запропонований критерій дозволяє з більшою вірогідністю виявляти оптимальний варіант завдяки мінімізації площині поверхні з найбільшими похибками. Оптимізація за цільовою функцією (5.11) також пропонує більшу кількість оптимальних варіантів, з множини яких можна вибирати раціональну орієнтацію за іншими критеріями.

На прикладі елементу корпусу з криволінійною поверхнею (рис. 5.18) представлено графік залежності відносної площині трикутних граней, нормальні яких задовольняють заданій умові (5.10), від кутів повороту 3D-моделі навколо координатних осей X і Y . Даний графік демонструє чималу область значень кутів повороту 3D-моделі, що забезпечують раціональну орієнтацію. Таке визначення області значень кутів φ_X , φ_Y представляє інтерес тому, що дозволяє додатково враховувати інші критерії вибору раціональної орієнтації.

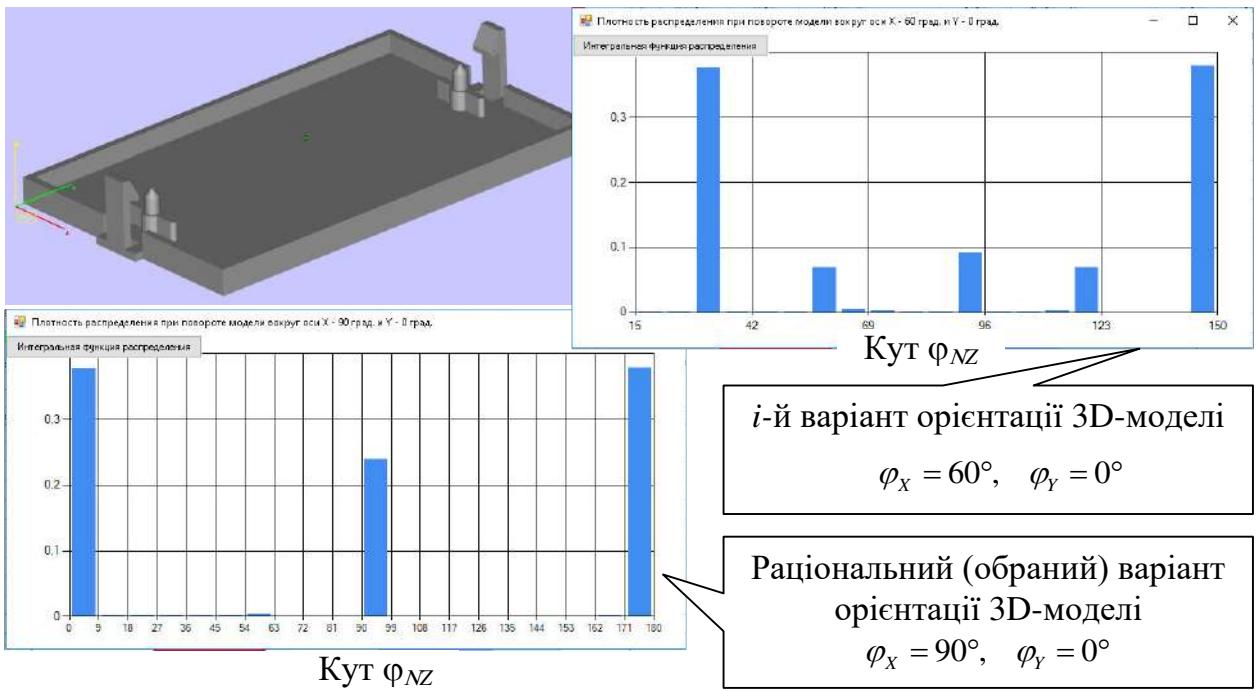


Рисунок 5.17 – Тестова 3D-модель виробу з простою геометрією поверхонь і гістограмами розподілу величин кута φ_{NZ} за площею граней

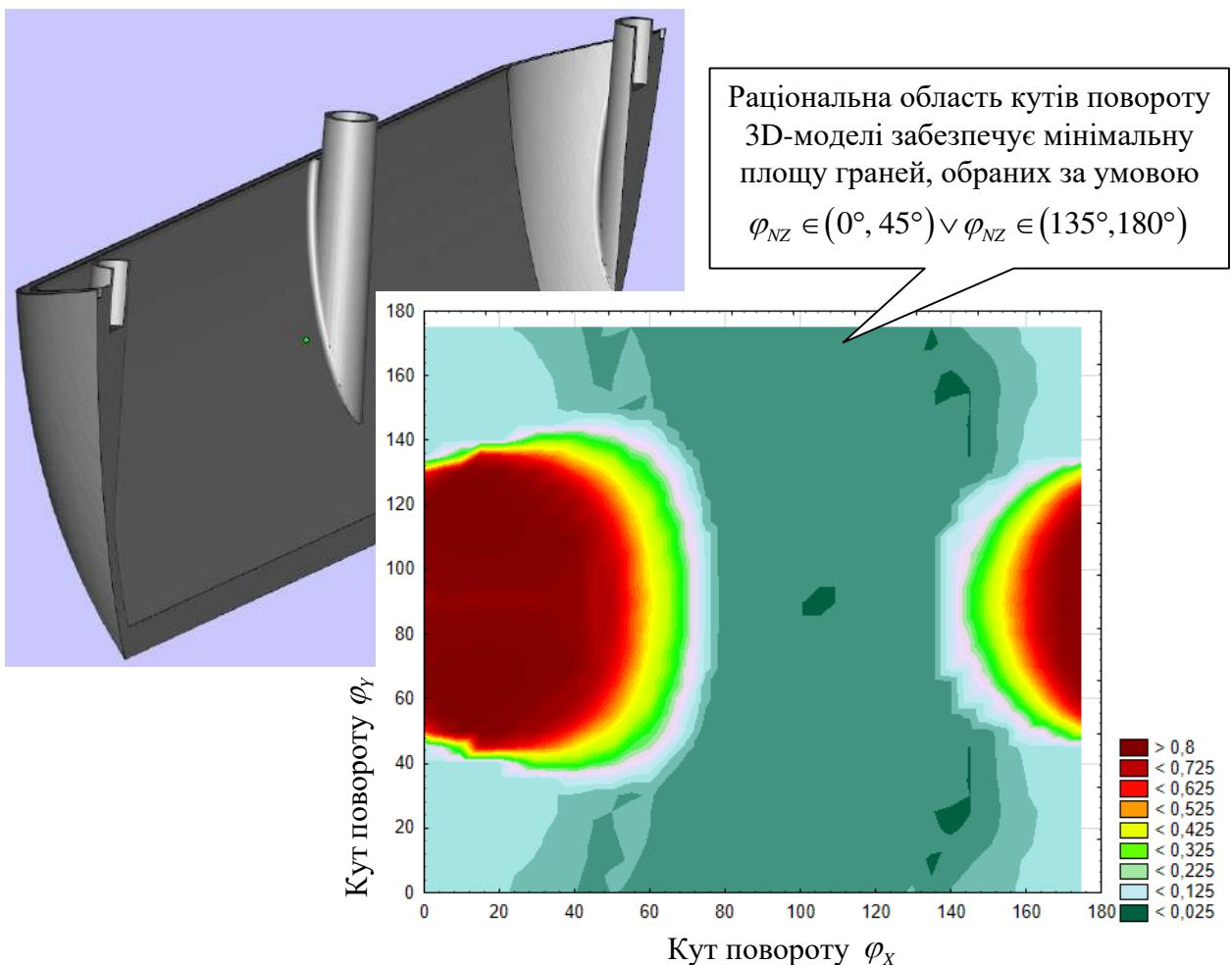


Рисунок 5.18 – Тестова 3D-модель виробу і графік відносної площи трикутних граней, що мають кут $\varphi_{NZ} \in (0^\circ, 45^\circ) \cup \varphi_{NZ} \in (135^\circ, 180^\circ)$ в залежності від кутів повороту 3D-моделі навколо координатних осей X і Y

Наприклад, висота виробу по осі Z , що впливає на час побудови.

Результати модельних досліджень показали, що визначення раціональної орієнтації виробу на основі цільової функції мінімізації площин з найбільшою величиною похибки формоутворення показує досить високу ефективність стосовно до виробів зі складною геометрією.

Визначення області значень кутів повороту тріангуляційної 3D-моделі для завдання раціональної орієнтації виробу дозволяє розширити можливості технологічної підготовки адитивних технологій шляхом збільшення варіантів раціональної орієнтації, що необхідно при вирішенні наступних задач технологічної підготовки АМ-процесів.

5.8 Статистичний аналіз пошарової 3D-моделі

Адитивні технології реалізують пошарові методи побудови виробів, тому однією з основних підсистем є та, яка реалізує статистичний аналіз пошарової 3D-моделі. Екранну форму підсистеми представлено на рис. 5.6-5.7.

Розроблена підсистема надає користувачеві наступні основні можливості:

- створення набору шарів з 2D-перетинами на основі полігональної 3D-моделі виробу за заданою стратегією формування (з постійним або змінним кроком побудови);
- візуалізація контуру перетину виробу для поточного шару з урахуванням масштабу відображення;
- статистичний аналіз і побудова гістограм розподілу досліджених ознак (кутів нахилу нормалей граней, що перетинаються шаром щодо осі Z і суміжних кутів між елементами контуру);
- аналіз фрактальної розмірності контурів за заданим діапазоном мір;
- визначення основних статистичних характеристик, які виводяться у єдину таблицю для всіх шарів;
- візуалізація результатів пошарового аналізу у вигляді щільності або інтегральної функції ймовірності.

Приділено увагу двом технологічним проблемам пошарової побудови.

Перша проблема - утворення відхилень від правильної форми (наприклад в роботі [292] відхилення оцінюються як шорсткість поверхні), що виникають в результаті ефекту "сходинок" від пошарової побудови. Друга - утворення відхилень від заданого контуру перетинів через його геометричну складність та технологічні обмеження.

Рішення першої проблеми призводять до раціонального вибору орієнтації виробу, стратегії розсічення і кроку побудови. Рішення другої - визначення величини зміщення при формуванні контуру і / або геометричних обмежень щодо формування заданого контуру для обґрунтованого вибору технологій.

У наступних підрозділах представлено можливості щодо вивчення обох проблем.

5.8.1 Оцінка відхилень від правильної форми, що виникають при пошаровій побудові

Адитивні технології отримання виробів засновані на пошарових методах побудови. Наслідком пошарової побудови є утворення на поверхні виробу "сходинок" з висотою, рівною кроку побудови h_l . Звичайно зменшення кроку побудови супроводжується зменшенням висоти сходинок і відхилень від умовної поверхні, що задається 3D-моделью.

Крок побудови h_l задається на основі інформації щодо розподілу кутів нахилу нормалей граней тріангуляційної моделі щодо осі Z з урахуванням залежності (5.3). У розробленій підсистемі передбачено аналіз щільності розподілу кутів Φ_{NZ} за кожним шаром окремо. Такий аналіз дозволяє обґрунтовано вирішувати технологічні задачі з мінімізацією відхилень від правильної форми Δ_i . Відомі експериментальні дані [292] підтверджують суттєвий вплив кутів Φ_{NZ} на відхилення від правильної форми та шорсткість одержуваної поверхні.

Існуючі підходи щодо визначення відхилень одержаної поверхні від заданої 3D-моделі не несуть достатньої інформації для виконання статистичного аналізу їхніх величин. Як правило розраховують об'ємні

відхилення [141], середньоарифметичну величину шорсткості [138, 293] або максимальну величину відхилень в поточному шарі [282]. Це при тому, що для виробів зі складною геометрією середньоарифметична і максимальна величини відхилень не є достатньо представницькими для аналізу. Особливо вони перестають бути достовірними при використанні стратегії зі змінним кроком пошарової побудови. На підставі критичного розгляду результатів аналізу елементів тріангуляційних 3D-моделей можна сформулювати основні проблеми, які слід врахувати при оцінці відхилень від правильної форми поверхонь у разі виробів зі складною геометрією:

- трикутні грані неоднакові за довжиною граней, співвідношенню довжин граней і площин;
- площа поверхні, що утворюється за один шар, не є постійною як для побудови з постійним кроком, так і зі змінним.

На рис. 5.19 представлено варіанти розрахунку відхилення від правильної форми поверхні Δ_{si} при утворенні "сходинки". У разі чималих граней поверхні (рис. 5.19 а), тобто для нескладних по геометрії виробів, розрахунок відхилення Δ_{si} цілком можливий за загальновідомою залежністю [282]:

$$\Delta_{si} = h_i \cdot \cos \varphi_{NZ}, \quad (5.12)$$

де h_i – крок побудови; φ_{NZ} – кут між векторами нормалі поверхні та напрямком побудови, як правило, обирається за мінімальною величиною з множини для граней, що потрапили у поточний шар, $\varphi_{NZ} = \{ p_i \cdot \varphi_{NZ} \}_{\min}$.

У деяких випадках додатково розраховують відхилення у площині січення 3D-моделі XY - "ширину сходинки" (показаної на рис. 5.19 а) за такою залежністю:

$$\Delta_{XYi} = h_i \cdot \operatorname{ctg} \varphi_{NZ}. \quad (5.13)$$

Такий підхід цілком припустимий при виборі кроку побудови h_i не більше розмірів граней тріангуляційної 3D-моделі, як показано на рис. 5.19 б. Але можуть бути інші випадки (представлені на рис. 5.19 в), коли крок побудови h_i більше різниці координат вершин граней по осі Z – $h_i > \Delta_z$,

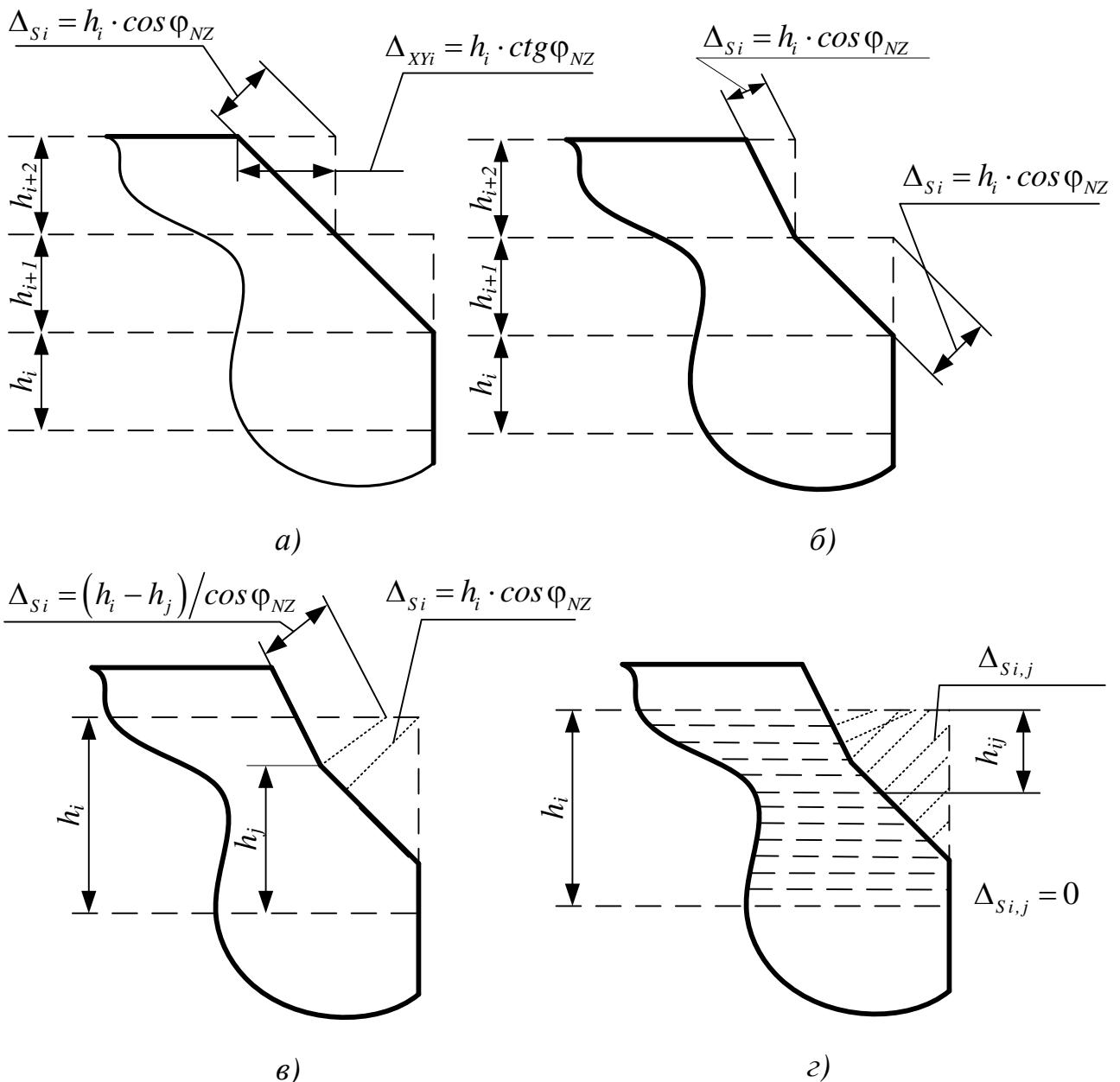


Рисунок 5.19 – Можливі варіанти способів визначення відхилень від правильної форми поверхні

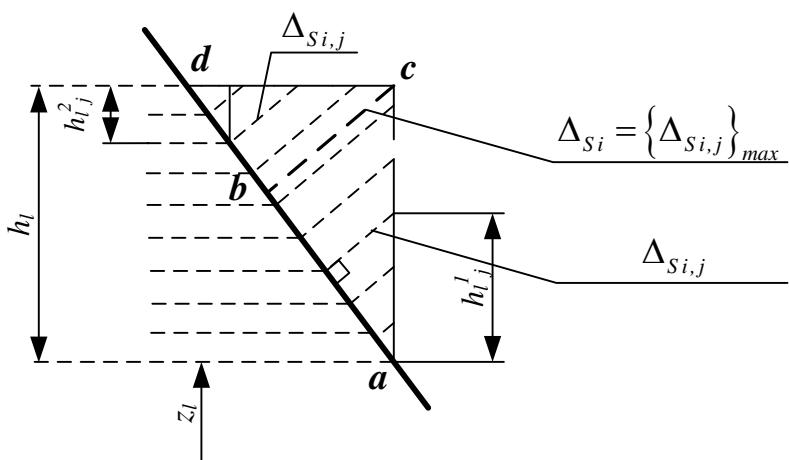


Рисунок 5.20 – Схема визначення відхилень від правильної форми поверхні на основі додаткових перетинів

$\Delta_z = \{p_i.z_{\max} - p_i.z_{\min}\}_{\max}$, а особливо за умови $h_l >> \Delta_z$. При таких умовах існуючі підходи не слід використовувати, так як виникають проблеми з обґрунтуванням схеми розрахунку, як представлено на рис. 5.19 в. Стосовно до виробів зі складною геометрією запропоновано схему розрахунку, представлена на рис. 5.19 г. В даному варіанті розрахунку пропонується проводити додаткове розсічення моделі з кроком рівним дискретності завдання положення січної площини по координатній осі Z (по напрямку побудови). Це в деякому наближенні дозволяє усунути недолік схеми розрахунку, що представлена на рис. 5.19 в. На рис. 5.20 представлена запропоновану схему розрахунку відхилень Δ_{si} .

Натомість взамін одного відхилення Δ_{si} для кожної грані поверхні виробу пропонується множина ділянок поверхні з відхиленнями $\Delta_{si,j}$. Такий варіант розрахунку відхилень є більш інформативним для статистичного аналізу за умови використання гістограм розподілу дослідженої характеристики не за кількістю граней, а площею ділянок. В результаті усуваються проблеми, що виникають через непостійність площ граней тріангуляційної моделі. Дані обставини обмежувала інформативність статистичного аналізу.

У відповідності зі схемою, представленою на рис. 5.20, відхилення $\Delta_{si,j}$ визначаються за такою залежністю:

$$\Delta_{si,j} = \begin{cases} h_{l,j}^1 \cdot \cos \varphi_{NZ}, & \text{якщо } z_j \leq z_l + h_l \cdot \sin^2 \varphi_{NZ}, \\ h_{l,j}^2 / \cos \varphi_{NZ}, & \text{у іншому випадку} \end{cases}, \quad (5.14)$$

де $h_{l,j}^1$, $h_{l,j}^2$ - відстань по координатній осі Z між січними площинами першим й j -м, та останнім й j -м, відповідно для l -го шару, $h_{l,j}^1 + h_{l,j}^2 = h_l$.

В залежності (5.14) присутня умова, що виникає через наявність двох обмежень для визначення відхилень $\Delta_{si,j}$. Максимальне значення відхилень $\Delta_{si,j}$ буде для січної площини з координатою $z_s = z_l + h_l \cdot \sin^2 \varphi_{NZ}$. Відхилення $\Delta_{si,j}$ для січної площини з розташуванням від z_l до z_s визначаються виходячи з обмеження від бічної поверхні "сходинки". У разі січної площини від z_s й до

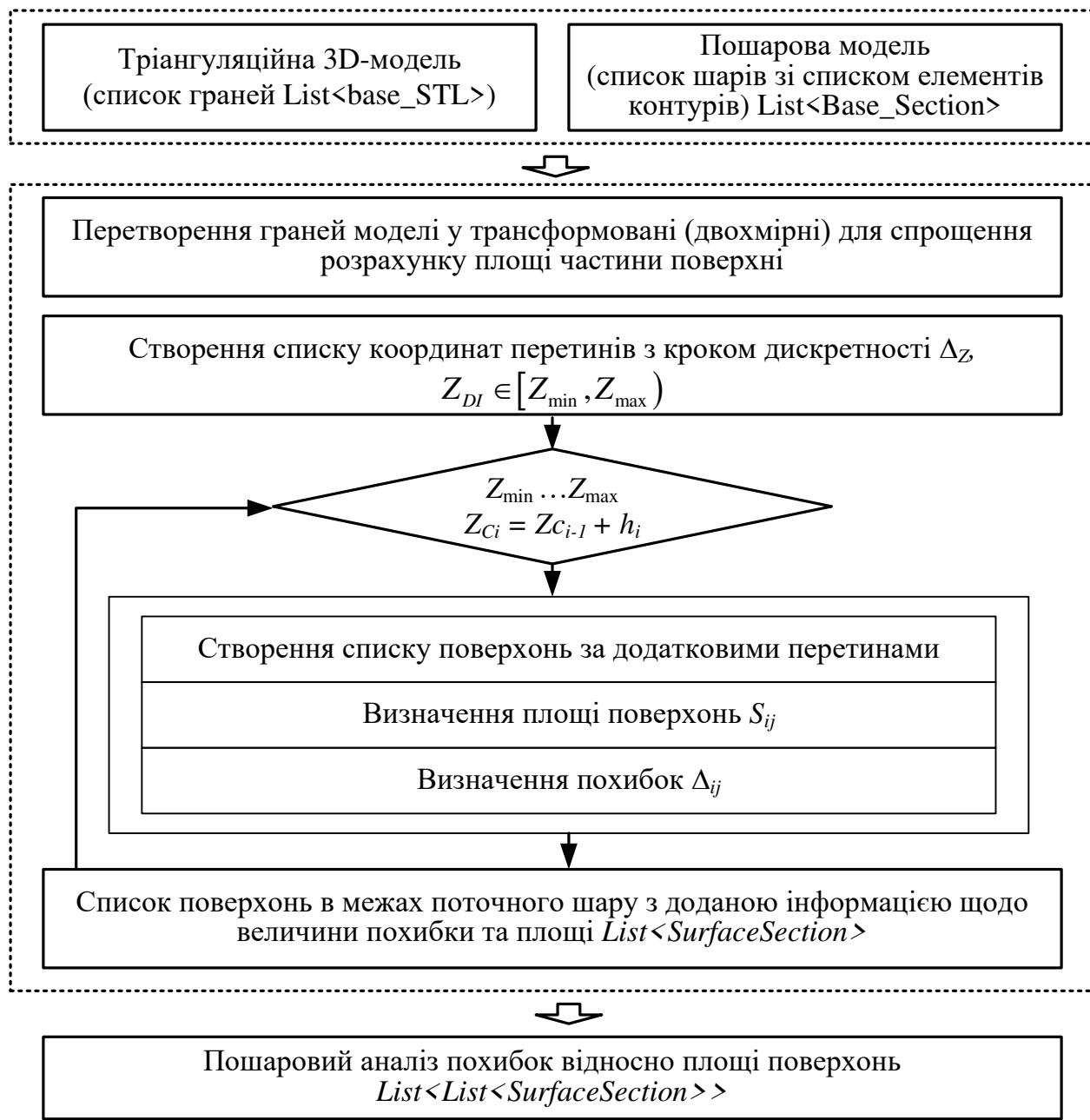
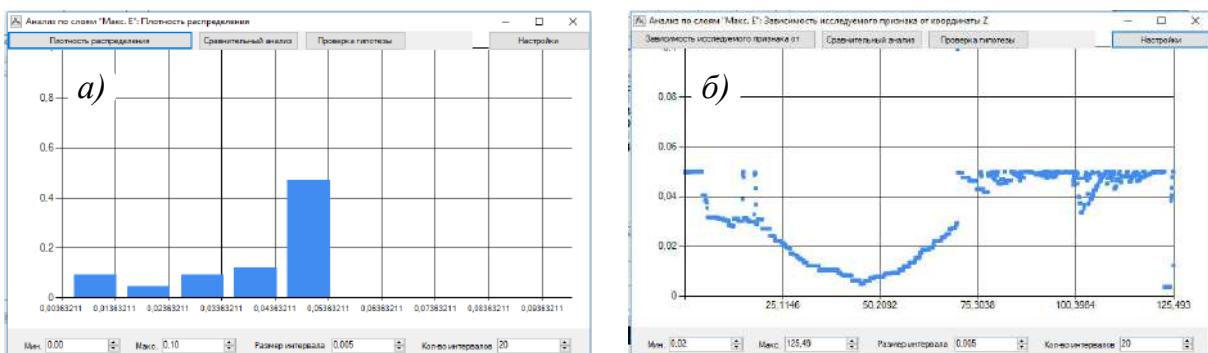


Рисунок 5.21 – Схема визначення величин відхилень від правильної форми поверхонь на основі додаткових перетинів 3D-моделі



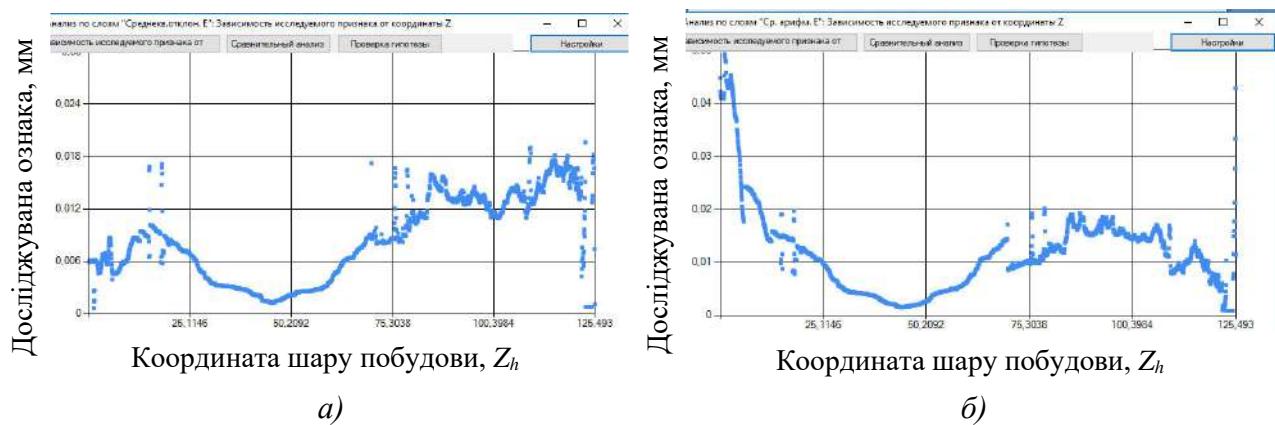
а – щільність розподілу; б – залежність дослідженої величини від координати розміщення шару побудови

Рисунок 5.22 - Результати статистичного аналізу розподілу максимальної величини відхилення від правильної форми поверхні при виготовленні групи виробів за кроком побудови $h_i = 0,02 \div 0,1$ мм і $\Delta_s = 0,03$ мм

z_{l+1} – від верхньої поверхні "сходинки".

Загальну схему визначення величин відхилень $\Delta_{si,j}$ представлено на рис. 5.21. На прикладі розміщення групи виробів наведено результати аналізу у вигляді щільності розподілу величин максимальних відхилень $\Delta_{si,j}$ (представленої на рис. 5.22 а) та їх розподіл серед шарів у залежності від координат їх розміщення за віссю Z (рис. 5.22 б).

Розширення можливостей аналізу можливо виконувати шляхом розгляду таких основних статистичних характеристик, як середньоквадратичне відхилення і середнє арифметичне значення. Їх залежність від координат розміщення шарів представлено на рис. 5.23.



а – середньоквадратичне відхилення Δ_s ; б – середньоарифметичне значення Δ_s

Рисунок 5.23 - Розподіл похибки форми Δ_s у залежності від координат шарів по осі Z при завданні $h_i = 0,02 \div 0,1$ мм та $\Delta_{Smax} = 0,03$ мм

Наведені можливості аналізу дозволяють обґрунтовано визначити ефективність стратегії пошарової побудови з перемінним кроком у залежності від вибраного варіанту орієнтації та розміщення виробів у робочому просторі.

У наступному підрозділі пропонується вивчити можливості оцінки складності контурів областей формоутворення на основі визначення їх фрактальної розмірності з урахуванням геометричних обмежень обраної технології та обладнання.

5.8.2 Оцінка фрактальної розмірності контурів пошарової побудови

Точність та ефективність процесу пошарової побудови залежить від ряду

технологічних параметрів і складності геометрії отримуваних поверхонь виробу і, відповідно, складності контурів областей формоутворення. Точність формоутворення при розгляді одержуваного виробу в січній площині, що проходить через координатну вісь Z (напрямок побудови), в основному визначається товщиною шарів матеріалу та орієнтацією поверхні [145, 305]. Наприклад, похилі поверхні, нормаль яких нахиlena під невеликим кутом щодо вектору напрямку побудови, матимуть більш виражений «ступінчастий» вигляд. У площині XY точність формоутворення залежить від більш широкого ряду факторів. Складність контуру області формоутворення є основним фактором, що залежить від геометричної складності і, відповідно, взаємного розташування поверхонь виробу. При аналізі контуру це визначається за суміжними кутами між відрізками прямих і мінімальними відстанями між ними. Ці фактори визначаються геометричними обмеженнями обраного адитивного методу та АМ-обладнанням:

- величина дискретності робочого середовища, наприклад, для технології SLS, DMD – це розміри зерен вихідного матеріалу; для DLP - дискретність проектування;

- точність робочих рухів (наприклад, для технологій SLS, SLA – це похибки відтворення траєкторії переміщення плями лазерного променю) яка, як правило, не є постійною в межах робочого простору установки тому, що залежить від координат матеріалу, що спікається;

- розміри утворюваного елементарного об'єму матеріалу, для SLS і SLM залежать від розмірів плями лазерного променю, для FDM - діаметра сопла екструдера.

Складність виробу визначатиме складність утвореного контуру. Оцінку складності контуру області формоутворення необхідно виконувати з урахуванням існуючих геометричних обмежень технології та АМ-обладнання. Гострі кути суміжних елементів контуру і вузькі його місця потрапляють під такі обмеження [93].

Експериментальні дослідження геометричних обмежень, тобто визначення гранично допустимих мінімальних розмірів різних елементів виробів, розглядались у досить великій кількості публікацій. У роботах [106, 294, 295] для технологій SLM, SLS і FDM визначено геометричні обмеження на такі елементи, як отвори, циліндри, тонкостінні стінки і накреслення шрифтів. Наприклад, в роботах [296, 297] представлено результати досліджень для SLS з виявлення мінімальних розмірів елементів конструкції в залежності від їх орієнтації.

Наприклад, в роботі [298] кількісна оцінка складності проводиться за відносною величиною периметру видимого контуру з заданої точки.

В даному розділі пропонується розглядати фрактальну розмірність контуру як міру його геометричної складності [299]. Зроблено припущення, що правильний підбір масштабу M (порівнянного з геометричними обмеженнями) для визначення фрактальної розмірності контуру дозволить обґрунтовано вибирати технологію та АМ-устаткування для отримання виробу.

Розглянуто наукову гіпотезу про те, що статистичний аналіз розподілу фрактальної розмірності контурів областей пошарового формоутворення дозволить науково-обґрунтовано визначати їх геометричну складність.

5.8.2.1 Підсистема статистичного аналізу пошарової 3D-моделі виробу.

Реалізацію дослідження виконано у розробленій підсистемі статистичного пошарового аналізу 3D-моделі виробу шляхом наступних дій:

- формування набору шарів з 2D-перетинами виробу (контурами областей формоутворення) на основі тріангуляційної 3D-моделі за заданою стратегією побудови (з постійним або змінним кроком);
- візуалізація поточного шару з урахуванням масштабу відображення;
- визначення фрактальної розмірності за заданим діапазоном масштабів (області скейлінга) для вимірювання довжини контуру;
- статистичний аналіз фрактальної розмірності контурів.

Перехід від вихідної тріангуляційної 3D-моделі виробу до набору шарів виконується за процедурою, розробленою з урахуванням існуючих робіт [281,

282], що реалізує стратегію з постійним та перемінним кроком побудови.

5.8.2.2 Метод масштабів

Набір шарів формується шляхом розсічення тріангуляційної 3D-моделі виробу набором паралельних площин. В результаті утворюються замкнуті контури, що складаються з відрізків прямих. Такі відрізки виходять у результаті перетину трикутних пласких граней 3D-моделі площиною перпендикулярній осі Z , яка задає положення шару матеріалу. У більшості випадків відрізки прямих щодо загальної довжини контуру є досить малими. Тому типова задача фрактальної геометрії за визначенням довжини кривої лінії з використанням міри заданої величини M (так званого «масштабу вимірювання» [299]) є цілком пристосованою до контурів областей пошарового формоутворення. Результатом вирішення такої задачі є коефіцієнт фрактальної розмірності D контуру для певної області скейлінга ΔM (інтервалу мір).

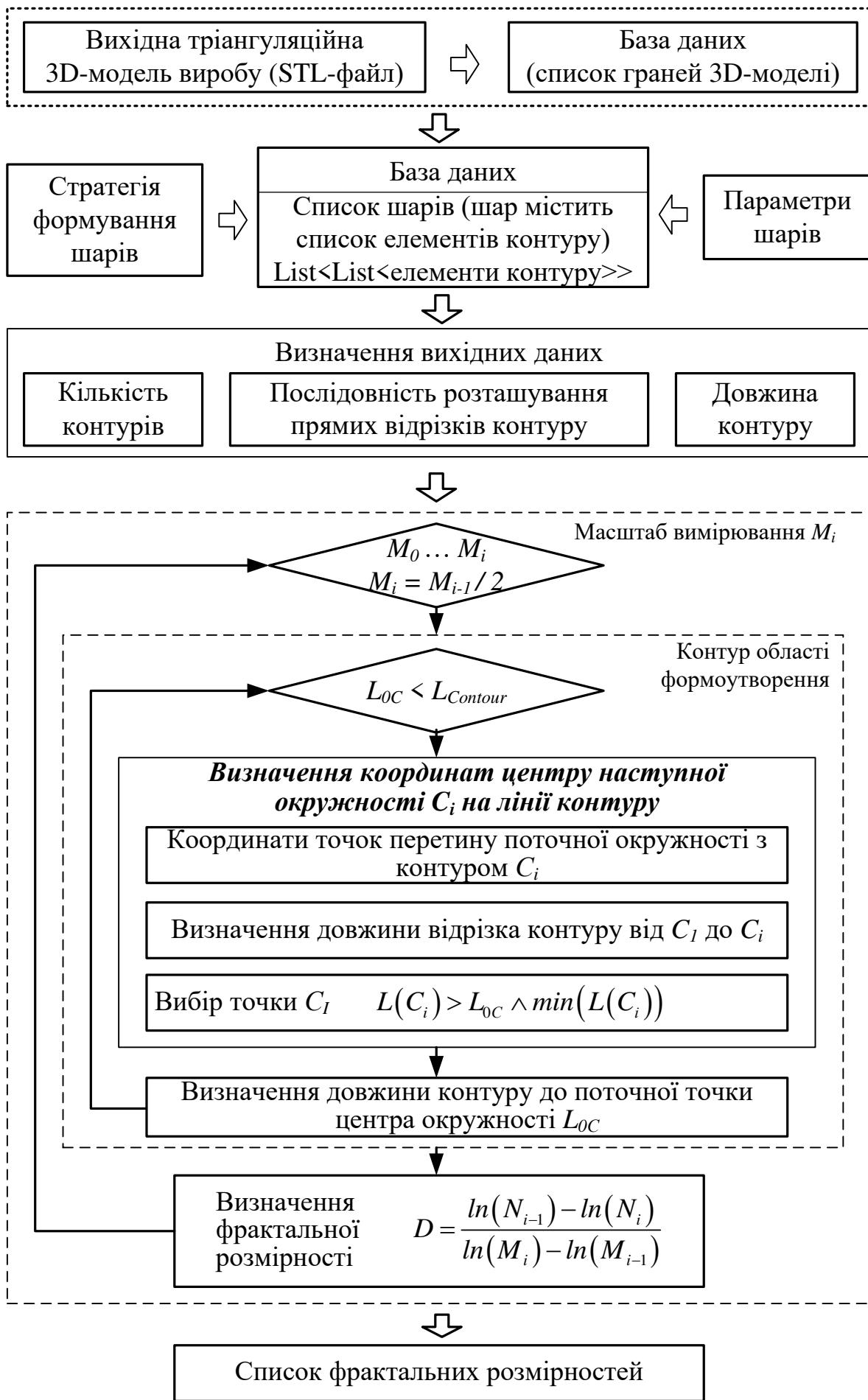
З огляду на теоретичні передумови [300], величина фрактальної розмірності D кількісно оцінює складність контуру, як коефіцієнт зміни в деталях зі зміною масштабу.

На практиці обов'язково існують обмеження щодо мінімального і максимального значення масштабу вимірювання M [301]. У даній роботі поставлено задачу оцінки складності контуру з урахуванням заданих геометричних обмежень. Тому величину M використано для визначення розмірності D при її задаванні в діапазоні значень геометричних обмежень.

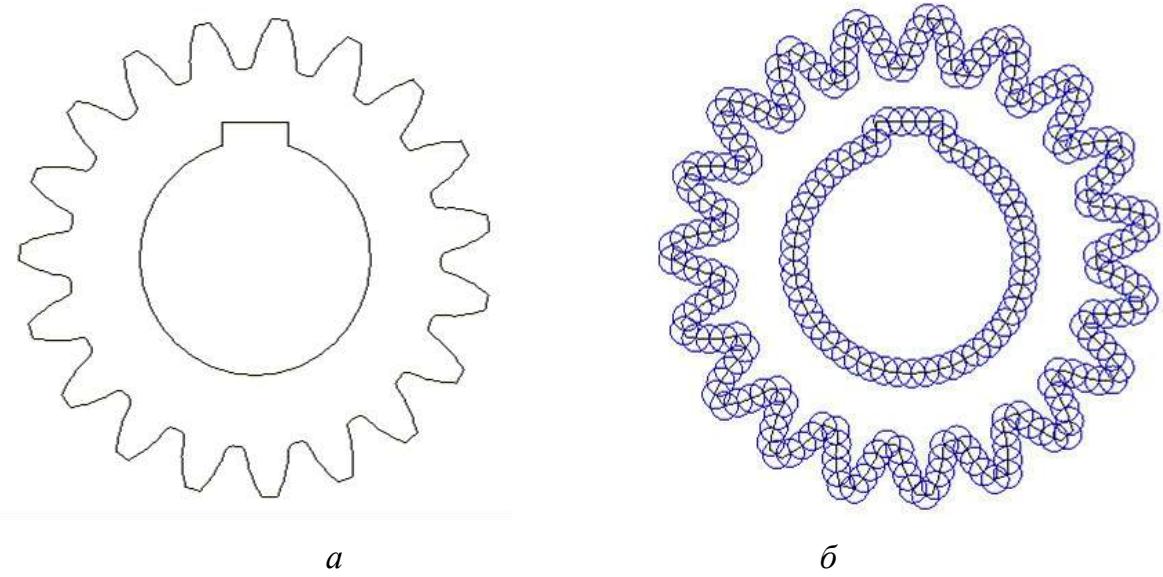
Схему визначення фрактальної розмірності контуру на основі пошарового аналізу тріангуляційної моделі представлено на рис. 5.24.

За даною схемою в процесі вимірювання довжини контуру L_C визначалася мінімальна кількість масштабів N (мір вимірів M), які покривають повністю контур [299] (на рис. 5.25 показано приклад візуалізації процедури вимірювання).

При послідовній зміні масштабу повторно здійснюється процес вимірювання. Масштабом називають прямий відрізок з довжиною M або коло з



радіусом M . Масштаб априорі приймається значно меншим ніж довжина вимірюваного контуру ($M \ll L_C$). Кількість N зростатиме при зменшенні величини M (для повного покриття контуру потрібна більша кількість масштабів меншого розміру).



a – вихідний контур; *б* – контур з накладенням масштабів

Рисунок 5.25 – Візуальний аналіз оцінки фрактальної розмірності контуру перетину 3D-моделі шестерні

Фрактальну розмірність визначають за такою залежністю [299]:

$$D = \frac{\ln(N_{i-1}) - \ln(N_i)}{\ln(M_i) - \ln(M_{i-1})}, \quad (5.15)$$

де M_i – міра (радіус кола) для i -го вимірювання довжини контуру;

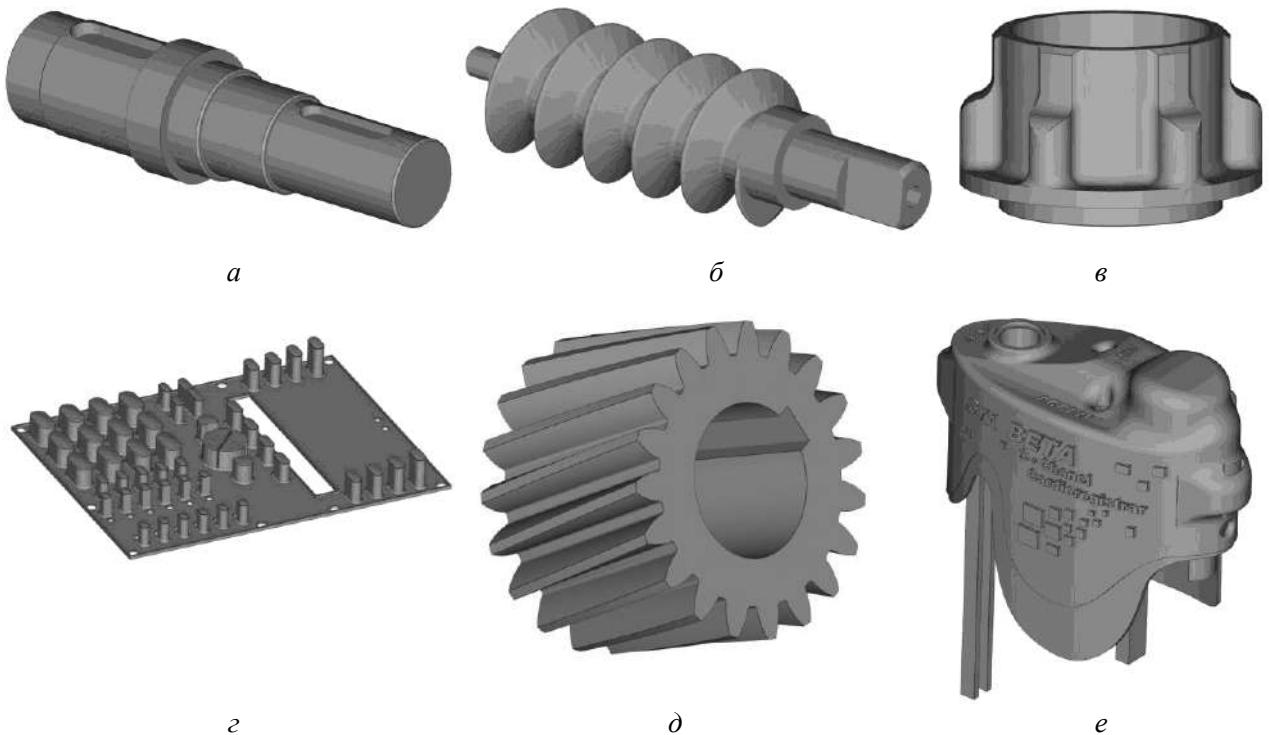
N_i – число масштабів (кіл з радіусом M_i), що покривають контур.

В результаті отримується за залежністю (5.15) коефіцієнт D , що може приймати нецілочислове значення, характеризуючи ступінь заповнення площини дослідженим контуром [302].

Контур складається з відрізків прямих та, відповідно, його фрактальна розмірність буде залежати від області скейлінгу $\Delta M = M_{i-1} - M_i$. При вимірюванні реального контуру з використанням міри $M \rightarrow 0$, тоді довжина $L_C = const$. В даному випадку, виходячи із залежності (5.15), фрактальна розмірність буде відповідати евклідовій розмірності контуру $D = 1$. Але, якщо врахувати, що при

зменшенні величини похибки тріангуляції CAD-моделі $\Delta_{mp} \rightarrow 0$ стосовно до складного виробу, що містить криволінійні поверхні, довжина контуру збільшується $L_C \rightarrow L_{C(M=0)}$. Отже, фрактальна розмірність контуру, отриманого шляхом розсічення площиною криволінійних поверхонь, завжди буде $D > 1$ (за умови, що величина міри не менша, ніж мінімальний прямий відрізок контуру).

Дослідження можливостей оцінки фрактальної розмірності контурів виконувалося на прикладі тестових моделей простих геометричних тіл і промислових виробів, представлених на рис. 5.26. Розсічення моделей виконувалося за стратегією з постійним кроком побудови. Глибина шару задавалася $h_L = 1$ мм. Таку завищену величину h_L обрано з міркувань зменшення обчислювального часу.



a- вал; *б* - шнек; *в* - корпус; *г* - панель; *д* - шестерня; *е* - кришка

Рисунок 5.26 – Тестові 3D-моделі

Первісна міра M_1 задавалася відповідно довжині контуру $M_1 = \{L_C / 10, L_C / 5\}$ або в абсолютних значеннях $M_1 = \{1, 2\}$ мм. Наступні величини мір задавалися за спадною геометричною прогресією $M_i = q \cdot M_{i-1}$ зі знаменником

$q = 2^{-1}$. Кількість вимірювань довжини контуру виконувалася до 5-ти разів з метою отримання більш широкої області скейлінга ΔM .

Отримані результати модельних розрахунків наведено в табл. 5.1 і 5.2.

Таблиця 5.1 - Фрактальна розмірність контурів перетинів 3D-моделей простих геометричних форм

Модель (Розміри, мм)	M_I , відн. значення	D_{Rel}	M_I , мм	D_{Abs}
Куб ($L = 100$)	$L_C / 10$	$1,00 \div 1,15$	2,0	1,00
	$L_C / 5$	$1,00 \div 1,17$	1,0	1,00
Сфера ($D = 100$)	$L_C / 10$	1,00	2,0	$0,99 \div 1,00$
	$L_C / 5$	1,00	1,0	$0,99 \div 1,00$
Конус ($D = 100, H = 100$)	$L_C / 10$	1,00	2,0	$0,99 \div 1,00$
	$L_C / 5$	1,00	1,0	$0,99 \div 1,00$
Тор ($D = 100, d = 10$)	$L_C / 10$	1,00	2,0	$0,99 \div 1,00$
	$L_C / 5$	1,00	1,0	$0,99 \div 1,00$
Циліндр ($D = 100, H = 100$)	$L_C / 10$	1,00	2,0	1,00
	$L_C / 5$	1,00	1,0	1,00
Пружина (100x100x10)	$L_C / 10$	$0,96 \div 1,15$	2,0	$0,99 \div 1,01$
	$L_C / 5$	$0,96 \div 1,15$	1,0	$0,99 \div 1,00$

Таблиця 5.2 - Фрактальна розмірність контурів перетинів 3D-моделей виробів

Модель (розміри, мм)	M_I , отн. значення	\bar{D}_{Rel}	M_I , мм	D_{Abs} (\bar{D}_{Abs})
Вал ($64 \times 64 \times 138$)	$L_C / 10$	1,05	2	$1,01 \div 1,02$ (1,01)
	$L_C / 5$	1,09	1	$1,00 \div 1,02$ (1,01)
Шнек ($40 \times 40 \times 144$)	$L_C / 10$	1,00	2	$1,00 \div 1,04$ (1,00)
	$L_C / 5$	1,00	1	$1,00 \div 1,01$ (1,00)
Корпус $210 \times 210 \times 125$)	$L_C / 10$	1,03	2	$1,00 \div 1,05$ (1,00)
	$L_C / 5$	1,02	1	$1,00 \div 1,01$ (1,00)
Панель ($152 \times 196 \times 20$)	$L_C / 10$	1,02	2	$1,00 \div 1,15$ (1,04)
	$L_C / 5$	1,07	1	$1,00 \div 1,11$ (1,04)
Шестерня ($86 \times 86 \times 60$)	$L_C / 10$	1,12	2	$1,01 \div 1,01$ (1,01)
	$L_C / 5$	1,24	1	$1,00 \div 1,01$ (1,00)
Кришка ($84 \times 101 \times 43$)	$L_C / 10$	1,10	2	$1,00 \div 1,12$ (1,02)
	$L_C / 5$	1,11	1	$1,00 \div 1,10$ (1,01)

Отримані модельним шляхом коефіцієнти D (табл. 5.1) відповідають теоретичним передумовам. Контури областей формоутворення для моделей куба, сфери, конуса, тора і циліндра відносяться до простих геометричних форм, таким як квадрат, коло, і т. д. (форма контуру залежить від орієнтації моделі). Тому для них фрактальна та Евклідова розмірності є рівними, тобто $D \approx 1$. Стосовно до моделі пружини спостерігаються більш складні контури, в

результаті чого отримано значення фрактальної розмірності, що перевищують Евклідову $D > 1$. У цьому випадку дослідженій контур можна віднести до об'єктів фрактальної геометрії.

Використання відносних величин M дозволяє отримати фрактальну розмірність незалежно від масштабу контуру. Така обставина дозволяє виконувати порівняльний аналіз контурів за їх складністю. При задаванні абсолютних величин M з'являється можливість оцінювати контур з урахуванням геометричних обмежень технологічного процесу.

Порівняльний аналіз контурів за їх складністю вимагає використання одного представницького показника. В якості такого показника прийнято середньоарифметичне значення фрактальних розмірностей n -го контуру \bar{D} , отриманих при різних масштабах M_i в межах області скейлінга.

Наведені в табл. 5.2 результати аналізу фрактальної розмірності контурів для моделей промислових виробів підтверджують взаємозв'язок складності контуру з коефіцієнтом \bar{D}_{Re_l} . Виходячи з даних, за коефіцієнтом \bar{D}_{Re_l} для розглянутих моделей шнек має найбільш прості за геометрією контури областей формоутворення. Моделі шестерні та кришки мають найбільш складні контури. Отже, дані моделі мають підвищені вимоги до технологічних можливостей обладнання для їх виготовлення. Під технологічними можливостями АМ-установок в даному контексті маються на увазі допустимі мінімальні розміри елементів виробу [106, 294, 295].

Модельні дослідження показали, що при перевищенні довжини контуру масштабом, тобто $L_C \leq M$, або при близьких їх величинах $L_C \approx M$, коефіцієнт $D < 1$.

Виконаний аналіз значень D_{Abs} підтверджив існування взаємозв'язку $D_{Abs} = f(M)$. З огляду на те, що явно найкраще відтворення контуру буде реалізовуватися для контуру з фрактальною розмірністю $D \approx 1$. Тому далі проводиться виявлення такого взаємозв'язку для оцінки впливу геометричних обмежень на точність відтворення контуру.

5.8.2.3 Взаємозв'язок величини міри і фрактальної розмірності контуру.

Виявлення впливу області скейлінга ΔM на фрактальну розмірність D_{Abs} виконувалося на прикладі моделі кришки. Для цієї моделі характерний досить складний контур з мінімальною повторюваністю довжини прямих ділянок, що дозволило мінімізувати вплив кратного накладення масштабів вимірювання на цих ділянках.

Отриману залежність $D_{Abs} = f(M)$ представлено на рис. 5.27.

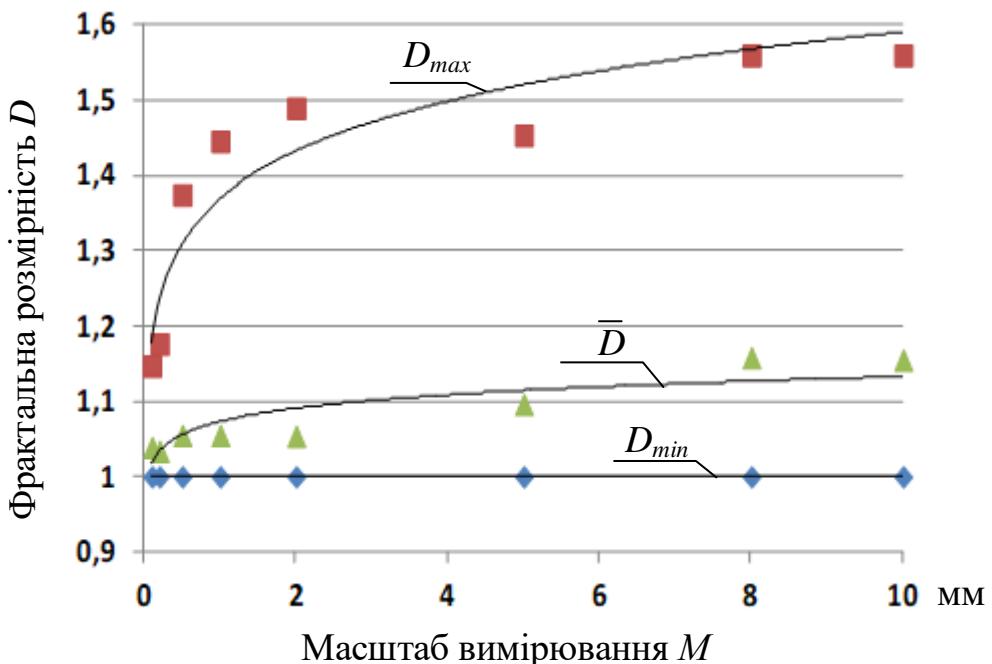


Рисунок 5.27 – Залежність фрактальної розмірності контурів від масштабу виміру для моделі кришки (рис. 5.26 е)

Модель кришки має мінімальне значення фрактальної розмірності $D_{Abs} = 1$ на всьому інтервалі області скейлінга ΔM . Максимальне значення D_{Abs} змінюється в досить широкому інтервалі значень – 1,147÷1,559. Середня величина D_{Abs} в меншому інтервалі значень – 1,034÷1,158.

Отримані закономірності взаємозв'язку $D_{Abs} = f(M)$ для моделі кришки (рис. 5.27) є загальними для розглянутих моделей виробів. По-перше, збільшення M призводить до збільшення D_{Abs} . По-друге, є винятки для окремих вимірів, що випадають із загальної залежності. Така особливість є закономірністю, так як спостерігається для всіх розглянутих моделей промислових виробів. Поясненням таких випадінь значень фрактальної

розмірності D_{Abs} може бути мала довжина деяких контурів або кратне накладання міри на прямі ділянки контуру. Така особливість не дозволяє виявити функціональної залежності як загальної, так і для окремо взятої моделі виробу. Відповідно, при виборі технічних характеристик АМ-обладнання необхідно модельним шляхом визначати фрактальну розмірність в області скейлінга ΔM , відповідної діапазону значень геометричних обмежень. Виходячи з виявлених закономірностей можна зробити припущення, що мінімальне відхилення фрактальної розмірності від Евклідової ($\bar{D}_{Abs} \approx 1$) буде вказувати на найбільш раціональний вибір технології виготовлення та устаткування для отримання заданої 3D-моделі.

Аналіз отриманих модельних даних показує, що взагалі для розглянутих моделей середнє значення фрактальної розмірності \bar{D}_n є цілком представницьким для оцінки складності контуру.

У наступному підрозділі вивчено можливість оцінки складності контурів областей пошарового формоутворення на основі клітинного методу визначення їх фрактальної розмірності з урахуванням геометричних обмежень використованої технології та обладнання.

5.8.2.4 Метод клітин

В даному підрозділі розглянуто наукову гіпотезу про те, що статистичний аналіз розподілу фрактальної розмірності контурів областей пошарового формоутворення з використанням клітинного методу вимірювання дозволить науково-обґрунтовано визначати їх геометричну складність і, відповідно, вибирати АМ-метод отримання виробу.

Схему визначення фрактальної розмірності контуру на основі пошарового аналізу тріангуляційної моделі представлено на рис. 5.28.

За даною схемою в процесі вимірювання довжини контуру L визначалася мінімальна кількість масштабів N (клітин розміром M), що покривають повністю контур [299] (на рис. 5.29 показано приклад візуалізації результату процедури вимірювання).

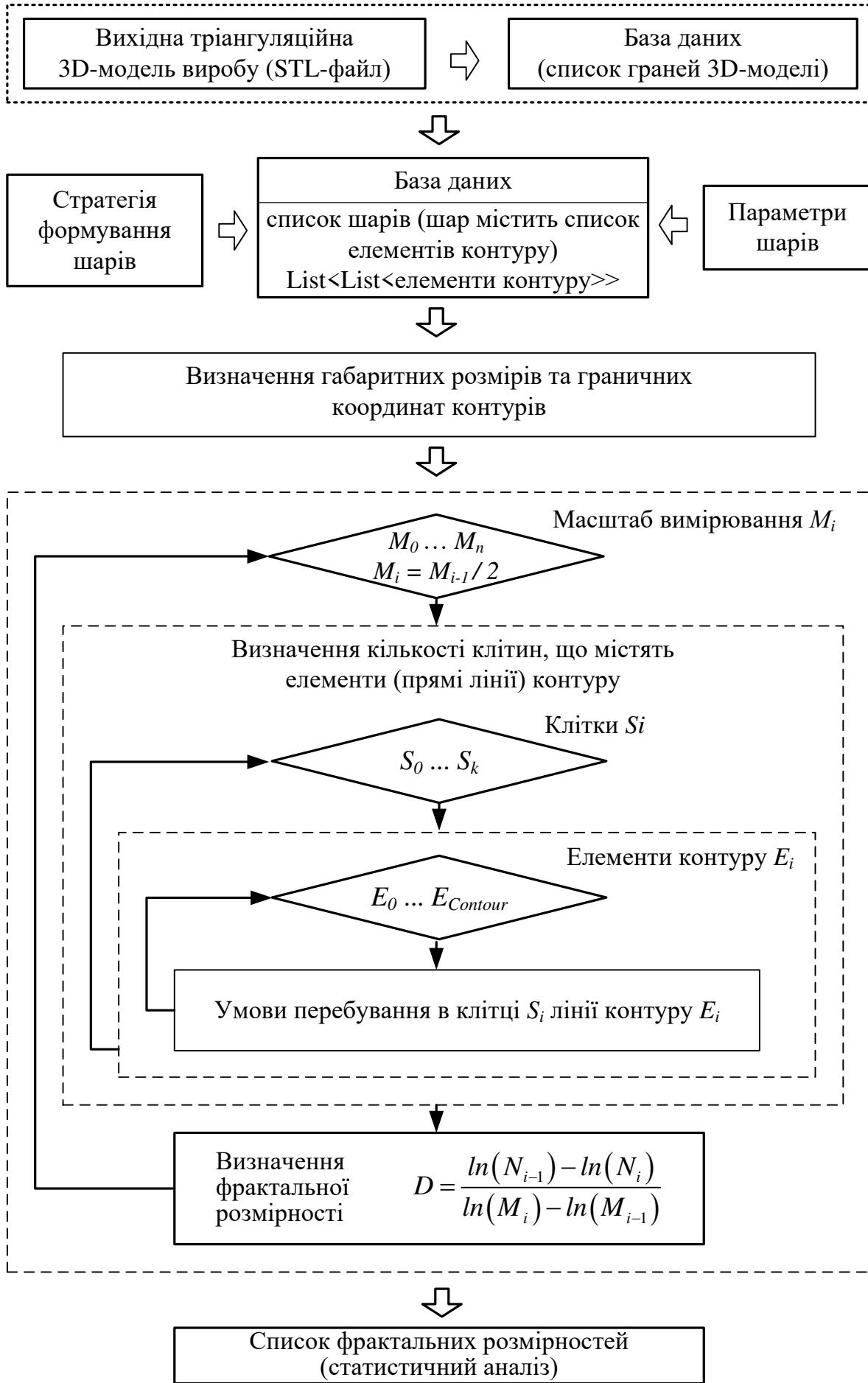
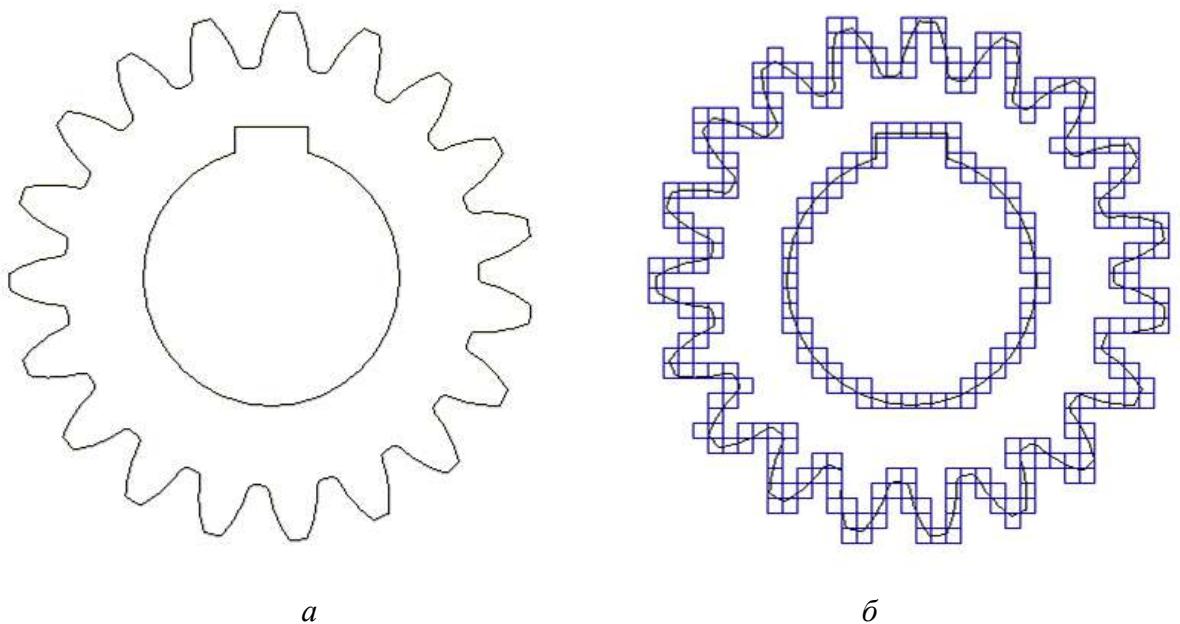


Рисунок 5.28 – Схема розрахунку фрактальної розмірності контуру



a – вихідний контур; *б* – контур з накладенням клітин

Рисунок 5.29 – Візуальний аналіз оцінки фрактальної розмірності контуру перетину моделі шестерні

Фрактальна розмірність контуру, отриманого шляхом розсічення площиною криволінійних поверхонь, завжди буде $D > 1$ (за умови, що розмір клітини M не менше розмірів контуру S_C).

Дослідження можливостей оцінки фрактальної розмірності контурів виконувалося на прикладі тестових моделей простих геометричних тіл та промислових виробів (рис. 5.26). Перетин моделей виконувався за стратегією з постійним кроком побудови. Глибина шару задавалася $h_L = 1 \div 3$ мм. Таку завищенну величину h_L обрано з міркувань зменшення обчислювального часу.

Первісна міра M_1 задавалася (такою як у дослідженні, представленому у розд. 5.8.2.3) відносно середньоарифметичної від габаритних розмірів контуру $M_1 = \{S_C / 10, S_C / 5\}$ або в абсолютних значеннях $M_1 = \{1, 2\}$ мм. Наступні величини мір задавалися за спадною геометричною прогресією $M_i = q \cdot M_{i-1}$ зі знаменником $q = 2^{-1}$. Вимірювання довжини контуру виконувалося до 3-х разів.

Результати модельних розрахунків за визначенням фрактальної розмірності контурів формоутворення для тестових промислових виробів (рис. 5.26) наведено в табл. 5.3, 5.4.

Таблиця 5.3 – Фрактальна розмірність контурів перетинів при використанні клітин з відносними розмірами

Модель (розміри, мм)	M_I	D_{Rel}	\bar{D}_{Rel}
Панель (152×196×20)	$S_C / 10$	$0,868 \div 1,463$	1,230
	$S_C / 5$	$0,925 \div 1,417$	1,228
Шестерня (86×86×60)	$S_C / 10$	$1,100 \div 1,136$	1,114
	$S_C / 5$	$1,196 \div 1,232$	1,218
Корпус (210×210×125)	$S_C / 10$	$1,165 \div 1,357$	1,218
	$S_C / 5$	$1,181 \div 1,441$	1,266
Сувенір (73×51×70)	$S_C / 10$	$0,918 \div 1,306$	1,096
	$S_C / 5$	$0,850 \div 1,264$	1,035
Ємність (102x94x125)	$S_C / 10$	$1,186 \div 1,321$	1,265
	$S_C / 5$	$1,096 \div 1,316$	1,180
Кришка (84×101×43)	$S_C / 10$	$1,000 \div 1,287$	1,131
	$S_C / 5$	$1,000 \div 1,453$	1,180

Порівняльний аналіз результатів виконувався за середньоарифметичною величиною коефіцієнтів \bar{D} , одержаною в межах загальної області скейлінга.

Таблиця 5.4 – Фрактальна розмірність контурів перетинів при використанні клітин з абсолютною розмірами

Модель (розміри, мм)	M_I , мм	D_{Abs}	\bar{D}_{Abs}
Панель (152×196×20)	2	$0,901 \div 1,122$	1,006
	1	$0,997 \div 1,004$	1,001
Шестерня (86×86×60)	2	$0,993 \div 1,013$	1,004
	1	$0,993 \div 1,010$	1,002
Корпус (210×210×125)	2	$0,995 \div 1,012$	1,001
	1	$0,998 \div 1,005$	1,000
Сувенір (73×51×70)	2	$0,942 \div 1,303$	1,112
	1	$0,792 \div 1,164$	1,044
Ємність (102x94x125)	2	$1,000 \div 1,171$	1,112
	1	$1,000 \div 1,010$	1,001
Кришка (84×101×43)	2	$0,975 \div 1,214$	1,018
	1	$0,992 \div 1,116$	1,014

Отримані модельним шляхом значення коефіцієнта D (табл. 5.3, 5.4) відповідають теоретичним передумовам.

Використання відносних величин M дозволило отримати фрактальну

розмірність незалежно від масштабу контуру (табл. 5.3). В даному випадку значення розмірності D виходять відносними, які можна зіставляти. Така обставина дозволяє виконувати порівняльний аналіз контурів за їх складністю. При використанні абсолютнох величин M (табл. 5.4) з'являється можливість оцінювати контур з урахуванням геометричних обмежень технологічного процесу.

Наведені в табл. 5.4 результати аналізу фрактальної розмірності контурів для моделей промислових виробів підтверджують передбачений взаємозв'язок складності контуру з коефіцієнтом \bar{D}_{Abs} . З розглянутих моделей корпус, шестерня і панель (рис. 5.26 а-в) мають найбільш прості за геометрією контури областей формоутворення. Модель сувеніра (рис. 5.26 г) має найбільш складні контури. Отже, дана 3D-модель буде пред'являти підвищені вимоги до технологічних можливостей АМ-обладнання для її виготовлення. Під технологічними можливостями АМ-установки в даному контексті мається на увазі гранично допустимі мінімальні розміри елементів виробу.

Виконаний аналіз значень D_{Abs} показав існування взаємозв'язку $D_{Abs} = f(M)$. Зроблено припущення, що найкраще відтворення контуру буде реалізовуватися для контуру з фрактальною розмірністю $D = 1$. Тому далі розглядається більш детально взаємозв'язок $D_{Abs} = f(M)$, що є необхідним для оцінки впливу геометричних обмежень на точність відтворення контуру.

5.8.2.5 Взаємозв'язок величини міри і фрактальної розмірності контуру.

Виявлення впливу області скейлінга на фрактальну розмірність контурів виконувалося на прикладі моделі кришки (рис. 5.26 е). Отриману залежність $D_{Abs} = f(M)$ представлено на рис. 5.30.

Для моделі кришки мінімальне значення коефіцієнта D_{Abs} істотно менше від евклідової розмірності ($D_{Abs} = E = 1$) на всьому інтервалі M (розмірів клітин). Дано обставина вказує на присутність дрібних контурів з розмірами, порівняними з масштабом вимірювання в межах всього інтервалу M . Максимальне значення D_{Abs} змінюється в досить широкому інтервалі значень –

$1,009 \div 1,948$. Середнє значення $\bar{D}_{Abs} = 1,000 \div 1,253$, суттєво в меншому інтервалі значень.

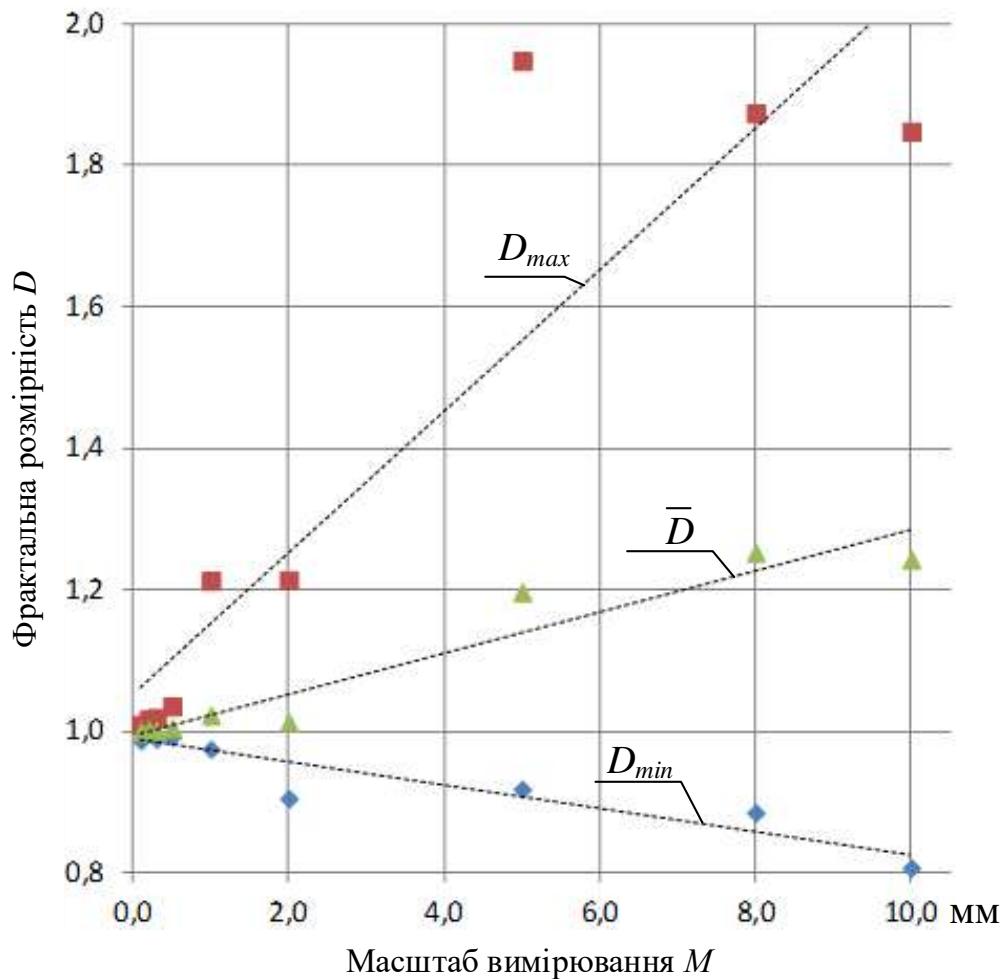


Рисунок 5.30 – Залежність фрактальної розмірності контурів від масштабу виміру для моделі кришки (рис. 5.26 е).

Отримані закономірності взаємозв'язку $D_{abs} = f(M)$ для моделі кришки (рис. 5.30) є загальними для розглянутих моделей виробів. По-перше, збільшення M призводить до збільшення D_{abs} . По-друге, залежність може бути описано кусочно-заданою функцією. Така особливість є закономірністю, так як спостерігається для всіх розглянутих моделей промислових виробів. Поясненням таких різких змін фрактальної розмірності D_{abs} можуть служити малі розміри деяких контурів або вплив кратного накладання клітин на ділянки контуру. Така особливість не дозволяє виявити функціональну залежність як загальну, так і для окремо взятої моделі виробу. Відповідно, при виборі технічних характеристик АМ-обладнання необхідно модельним шляхом

визначати фрактальну розмірність в області скейлінга ΔM відповідного діапазону значень геометричних обмежень. Виходячи з виявлених закономірностей, можна зробити припущення, що мінімальне значення фрактальної розмірності буде вказувати на найбільш раціональний вибір технології та обладнання для матеріалізації заданої 3D-моделі.

У наступному підрозділі представлено результати вивчення можливості візуальної оцінки технологічності конструкції виробу стосовно до задачі визначення раціональної орієнтації в робочому просторі пошарової побудови АМ-установки.

5.9 Візуальний і статистичний аналіз тріангуляційної 3D-моделі виробу

Одним з напрямків досліджень, спрямованих на підвищення ефективності оцінки технологічності, вдосконалення конструкції та стратегії виготовлення адитивними методами пошарової побудови, є розвиток інструментів візуалізації (з використанням колірних шкал) величин досліджуваної ознаки безпосередньо на 3D-моделі виробу [99, 303].

Оцінка конструкції виробу на пристосованість до визначення раціональної орієнтації на етапах конструкційної і технологічної підготовки становить інтерес для забезпечення ефективності АМ-процесів.

В якості найбільш представницької дослідженої ознаки елементів (граней) тріангуляційної моделі, з урахуванням робіт [91, 138], для візуального (колірного) аналізу був обраний кут між нормальними граней та вектором напрямку побудови φ_{NZ} . Дана досліджувана ознака є найбільш значущою з геометричних властивостей тріангуляційної 3D-моделі, тому що визначає шорсткість і похибки формоутворення поверхонь, потребу для ділянки поверхні в підтримуючих структурах (як наприклад, для способів SLA й FDM) і в процесах постобробки, впливає на вибір кроку побудови і, отже, на фізико-механічні властивості матеріалу та час виготовлення виробу.

Кут нахилу поверхні щодо вектору напрямку побудови розраховується за

коєфіцієнтами одиничного вектору його нормалі N_x , N_y , N_z . Величини коєфіцієнтів N_x , N_y , N_z , як правило, представлені в вихідному STL-файлі. В іншому випадку вони визначаються за відомими залежностями на основі координат вершин трикутної грані [206].

В роботі [304] пропонується розроблена комп'ютерна підсистема колірної візуалізації тріангуляційних моделей. Ця підсистема передбачає список досліджених ознак, в якому також присутні напрямні косинуси (координати векторів) нормалей трикутних граней щодо осі Z. Недоліком такої підсистеми є недостатня наочність для достовірного аналізу. Особливо такий недолік явно виражений для складних з геометрії виробів. Це при тому, що переваги адитивних технологій ефективніше реалізуються для виробів зі складними топологією і геометричними формами. Тому кольорове відображення кутів нахилу векторів нормалей граней безпосередньо на 3D-моделі складного виробу не є достатньо представницьким для подальшого прийняття рішень на етапі технологічної підготовки.

У даній роботі пропонується наукова гіпотеза про те, що колірна візуалізація досліджені характеристики (відносної площині або кількості) трикутних граней моделі складного виробу, відображеного на тріангуляційну модель сфери за загальними ознаками орієнтації нормалей граней (кутів нахилу векторів нормалей в сферичній системі координат), може дозволити істотно підвищити рівень наочності при оцінці придатності конструкції для раціональної орієнтації виробу в робочій області побудови і, відповідно, технологічності його виготовлення з використанням АМ-процесів.

Дослідження виконувалось в підсистемі колірної візуалізації тріангуляційної 3D-моделі виробу, призначеної для відпрацювання його конструкції при вирішенні задач технологічної підготовки. Підсистема входить в систему технологічної підготовки матеріалізації складних виробів адитивними методами.

При розробці підсистеми колірної візуалізації тріангуляційної моделі виробу вирішувалися такі основні задачі:

- оцінка коректності та раціональності тріангуляції CAD-моделі;
- відпрацювання конструкції на технологічність для раціонального використання АМ-процесів;
- візуальна оцінка можливості визначення раціональної орієнтації виробу в робочому просторі пошарової побудови.

Екранну форму підсистеми колірної візуалізації представлено на рис. 5.9. Система дозволяє виконувати візуалізацію 2D-моделі за колірною шкалою, а також виконувати статистичний аналіз за 16 досліджуваними ознаками. Розроблена підсистема надає користувачеві наступні основні можливості завдання параметрів і режимів роботи:

- вибір дослідженого ознаки з 16 характеристик, запропонованих для аналізу 3D-моделі виробу з урахуванням робіт [93, 305];
- автоматичне формування колірної шкали при завданні кількості інтервалів і кольору для першого та останнього інтервалу (компоненти адитивної колірної моделі *RGB* визначаються за лінійною залежністю);
- редагування інтервалів колірної шкали або вибіркове їх видалення у відповідності значень досліджуваної ознаки;
- редагування кольору для кожного інтервалу значень окремо з використанням діалогового вікна вибору кольору;
- збереження кольорової 3D-моделі в формати *PLY*, *AMF* і для додаткового аналізу у вигляді таблиці даних у формат *XLS* (або в формат *TXT* при відсутності *MS Excel*);
- статистичний аналіз і побудова гістограм розподілу досліджених ознак за кількістю і площею трикутних граней;
- запис даних розрахунків у загальну таблицю для порівняльного аналізу;
- визначення основних статистичних характеристик (12 параметрів);
- збереження результатів статистичного аналізу в файл *XLS*-формату для подальшого аналізу з використанням стороннього програмного забезпечення;
- візуалізація результатів аналізу у вигляді щільності або інтегральної функції ймовірності (рис. 5.31).

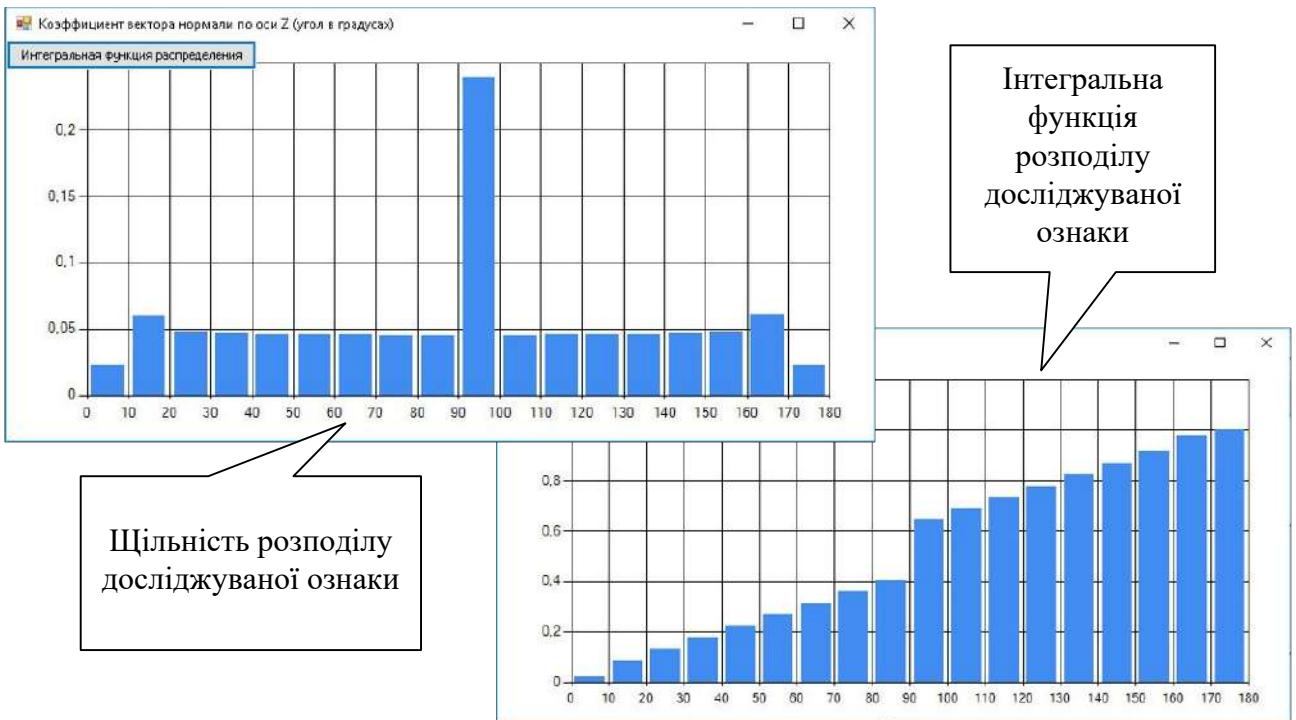


Рисунок 5.31 – Візуалізація результатів аналізу

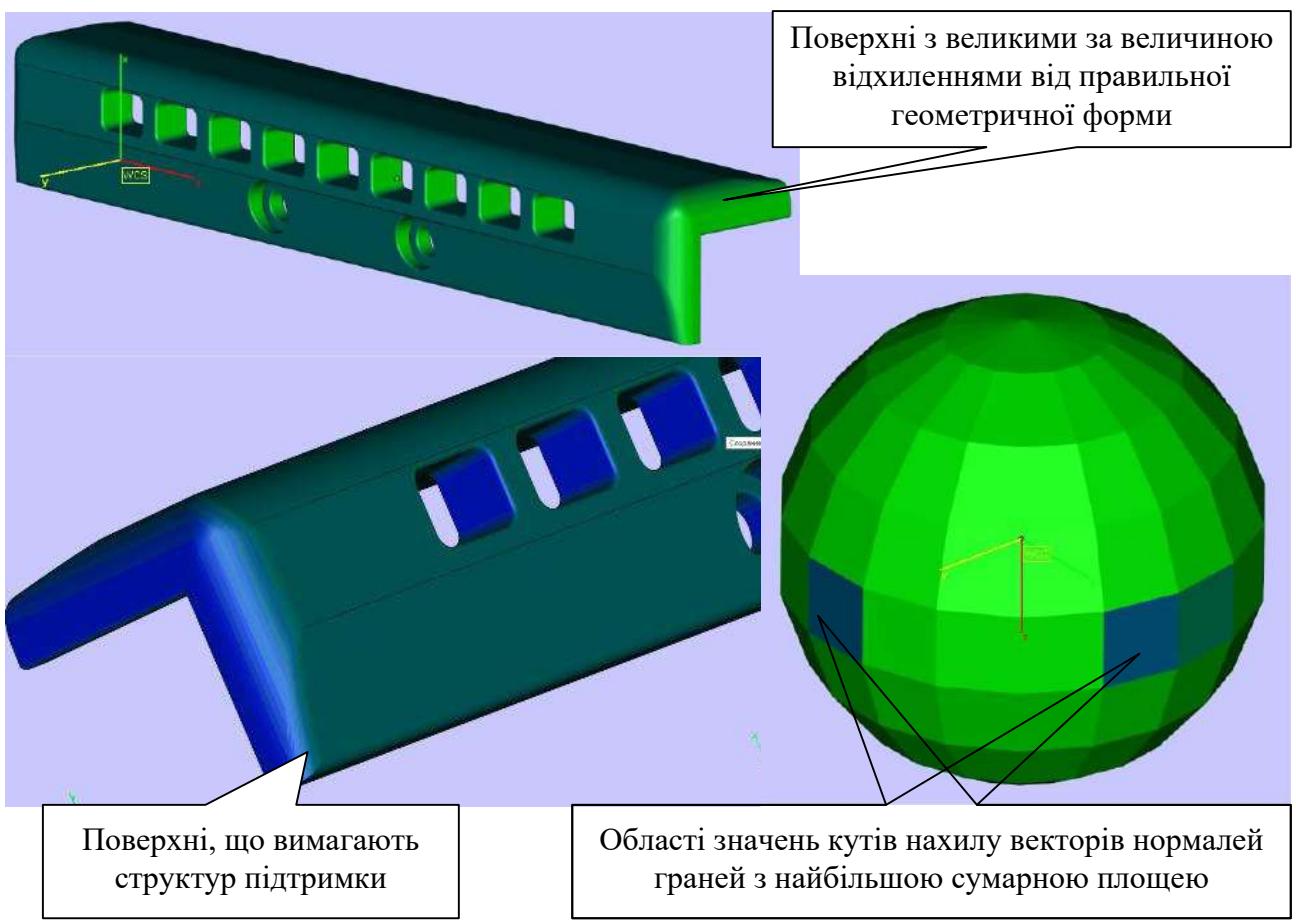


Рисунок 5.32 - Колірна візуалізація моделі виробу за коефіцієнтом одиничних векторів нормалей граней N_Z (a) і відображенням на сферу (б)
за сумарною площею граней

Вибір орієнтації виробу в робочому просторі побудови АМ-установки визначає тривалість виготовлення і похибки формування поверхонь.

Складність оцінки технологічності для вирішення задач раціональної орієнтації пов'язана з великою кількістю обмежуючих факторів [74, 102, 109]. Основною інформацією для визначення раціональної орієнтації виробу є коефіцієнти одиничних векторів для нормалей граней тріангуляційної моделі виробу [73, 91].

Стосовно до пошарових методів виготовлення АМ-процесами похилі поверхні виробу (при умові $\varphi_{NZ} \neq \{0^\circ, 90^\circ, 180^\circ\}$) мають «ступінчастий» вид. Тому найбільші відхилення від правильної форми поверхонь спостерігаються для граней, що мають кут між векторами їх нормалей і напрямком побудови (координатна вісь Z) в наступних інтервалах значень $\varphi_{NZ} \in (0^\circ, 45^\circ)$ і $\varphi_{NZ} \in (135^\circ, 180^\circ)$ [292]. Більш висока точність поверхонь досягається шляхом формування їх при обводі лазерним променем контуру в площині шару XY , тобто найменші відхилення форми характерні для поверхонь, що мають $\varphi_{NZ} \in (45^\circ, 135^\circ)$. Мінімальна величина відхилень буде при $\varphi_{NZ} = 90$. Для ряду способів пошарового виготовлення (*SLS*, *SLM*, *FDM* і т. д.) "звисаючі" поверхні вимагають створення структур підтримки [75]. До таких поверхонь відносяться грані з $\varphi_{NZ} \in (\varphi_{NZ_min}, 180^\circ)$, де φ_{NZ_min} - мінімальне значення кута нахилу вектору щодо напрямку побудови нормалі граней, що вимагають структур підтримки. Залежно від способу виготовлення і вихідного матеріалу для створюваного виробу $\varphi_{NZ_min} = 130^\circ \div 145^\circ$ [75].

Виконання візуального та статистичного аналізу за кутами φ_{NZ} становить найбільший інтерес для визначення орієнтації виробу. Як приклад на рис. 5.32. представлено колірну візуалізацію 3D-моделі виробу за коефіцієнтом одиничних векторів нормалей граней N_Z (рис. 5.32 а) і відображенням на сферу (рис. 5.32 б) за сумарною площею граней. При технологічній підготовці колірна візуалізація моделі виробу за коефіцієнтом N_Z (рис. 5.32 а) пропонує необхідну інформацію для прийняття рішень по створенню опорних структур і постобробці завдяки відображення областей з підвищеними відхиленнями

форми і тих, що вимагають підтримки. Але така візуалізація має обмеження при використанні на прикладі виробів, що мають велику кількість складних поверхонь. Тому для зняття обмежень, що накладаються особливостями досліджуваної конструкції, пропонується виконувати відображення на сферу моделі виробу за такими досліджуваними ознаками, як площа граней та їхня кількість. Умовою відображення на межі сфери є потрапляння значень кутів нахилу векторів нормалей граней моделі виробу, у сферичної системі координат, в область значень певної грані сфери.

Перехід від коефіцієнтів N_x, N_y, N_z одиничного вектору нормалі i -ї грані моделі виробу до кутів θ, φ у сферичної системі координат (θ, φ — зенітний і азимутальний кути відповідно) виконується за відомими залежностями [206]:

$$\theta = \arctg \left(\frac{\sqrt{N_{X(i)}^2 + N_{Y(i)}^2}}{N_{Z(i)}} \right), \quad \varphi = \arctg \left(\frac{N_{Y(i)}}{N_{X(i)}} \right).$$

Особливість тріангуляційної моделі сфери, одержуваної в CAD-системах, полягає в описанні ребрами граней ліній "паралелей" і "меридіанів" з двома полюсами. Така особливість є зручною для визначення інтервалів кутів нахилу нормалі трикутної грані, необхідної для виконання відображення на сферу моделі виробу. Межі інтервалів значень кутів θ, φ для i -ї грані сфери визначаються мінімальним і максимальним значеннями координат вершин грані в сферичної системі координат. Координати θ, φ вершини грані для сфери з початком системи координат в її центрі визначаються за наступними залежностями [206]:

$$\theta_j = \arctg \left(\frac{\sqrt{x_{V(j)}^2 + y_{V(j)}^2}}{z_{V(j)}} \right), \quad \varphi_j = \arctg \left(\frac{y_{V(j)}}{x_{V(j)}} \right),$$

де $x_{V(j)}, y_{V(j)}, z_{V(j)}$ — координати j -ї вершини трикутної грані сфери в декартовій системі координат.

Представленний приклад на рис. 5.32 б демонструє спрощення аналізу

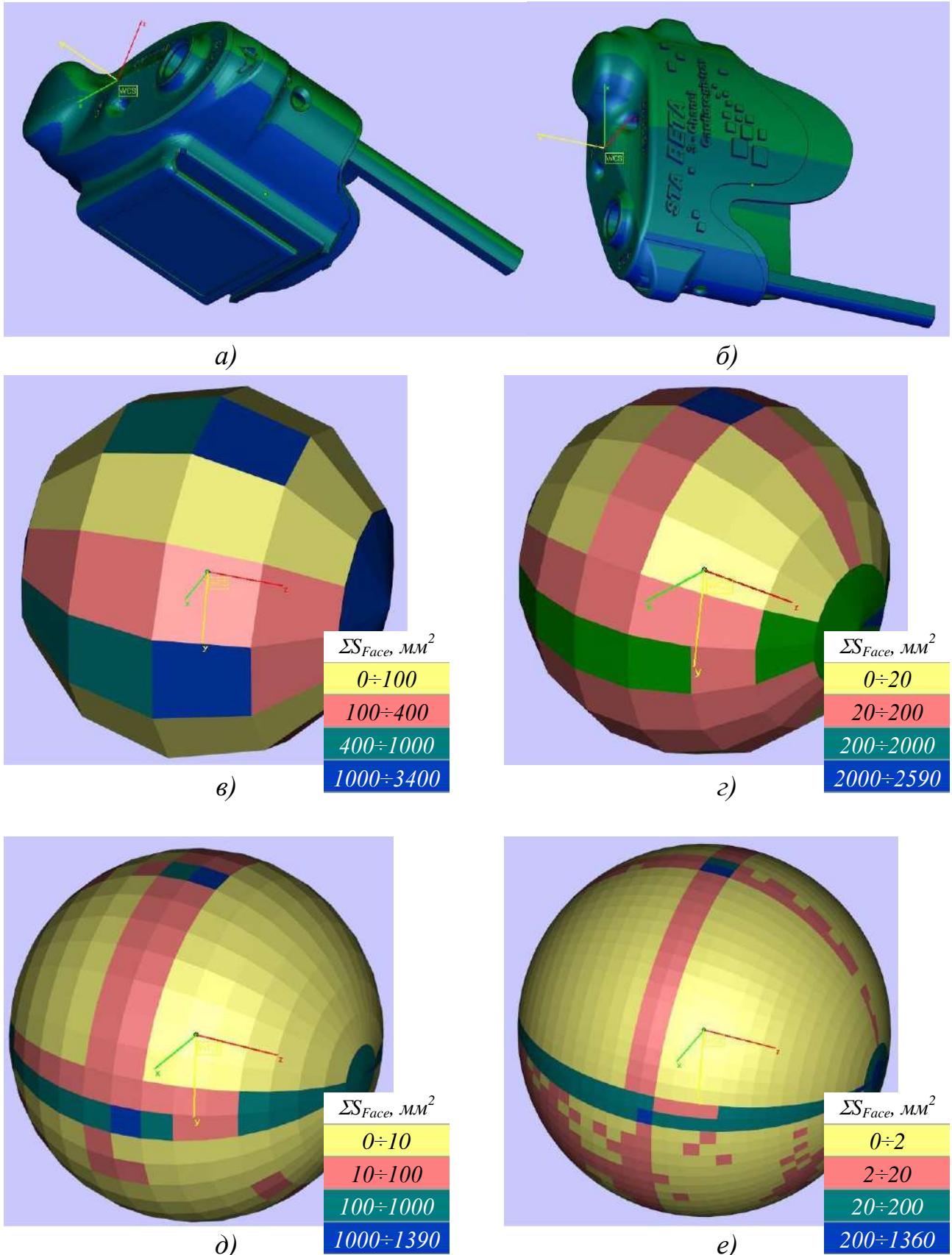


Рисунок 5.33 - Колірна візуалізація моделі кришки за коефіцієнтами одиничних векторів нормалей граней N_Z (а) і N_Y (б) та відображенням на сферу сумарної площин граней при наступних інтервалах кутів нахилу векторів нормалей в сферичної системі координат: 30° (с), 20° (г), 10° (д), 5° (е)

моделі виробу, що дозволяє істотно підвищити рівень наочності при оцінці придатності конструкції для раціональної орієнтації виробу в робочому просторі побудови і, відповідно, технологічності його виготовлення АМ-процесами.

Важливим є визначення раціонального ступеню деталізації відображення на сферу, тобто кількості інтервалів значень для кутів θ , ϕ нахилу нормалей. Представленний приклад на рис. 5.33 показує як збільшення кількості граней на сфері дозволяє більш інформативно оцінювати складність конструкції. Але при цьому слід враховувати, що інтервали значень кутів нахилу нормалей граней моделі виробу, що визначають поверхні з низькою і високою точністю побудови, а також потребують структур підтримки, виходячи з практики використання АМ-процесів, становлять $20^\circ \div 45^\circ$. Тому для оцінки технологічності виробу, стосовно до задачі його орієнтації, краще використання сфери з інтервалом кутів $20^\circ \div 30^\circ$, які представлено на рис. 5.33 в, г.

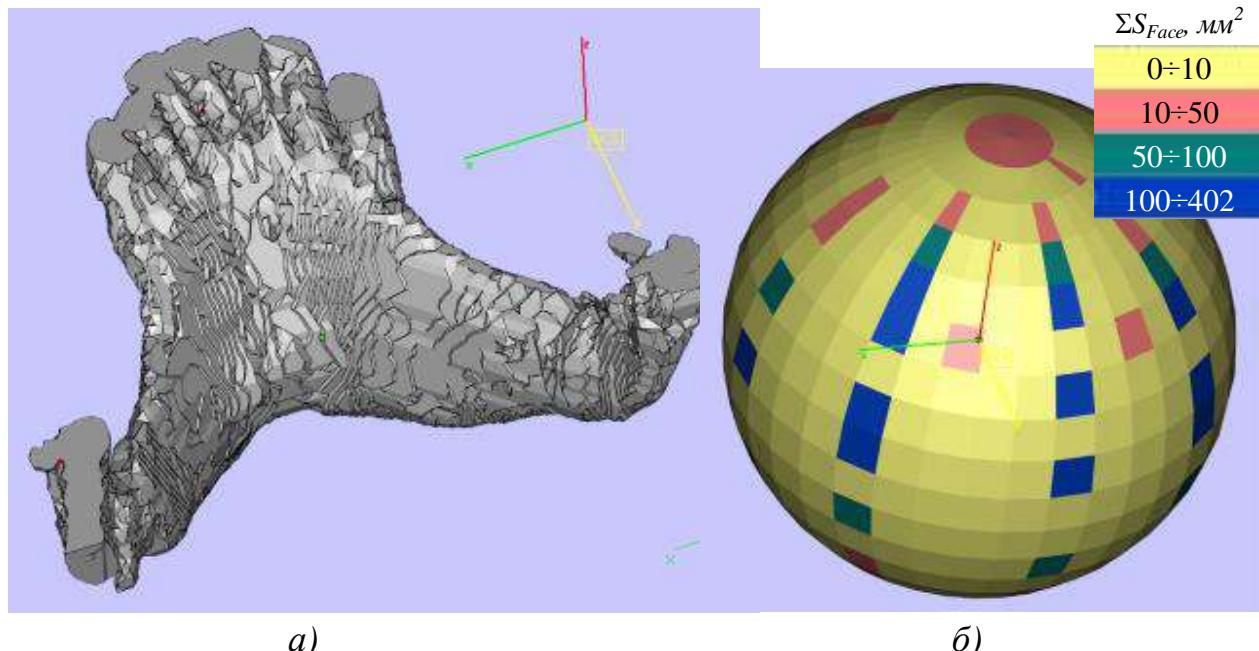


Рисунок 5.34 - Відображення на сферу моделі щелепи

На рис. 5.34 а представлена 3D-модель щелепи, обраної в якості прикладу складного виробу, що не має очевидного рішення задачі раціональної орієнтації та додатково підтверджує можливість підвищення рівня наочності оцінки

шляхом відображення на сферу. Візуальний аналіз такої моделі не дозволяє визначити раціональну орієнтацію у робочому просторі побудови АМ- установки. Представлене відображення на сферу на рис. 5.34 б демонструє високий рівень інформативності для визначення раціональної орієнтації. Орієнтуючи поверхні з більшою площею таким чином, щоб нормалі їх граней мали мінімальне відхилення від площини побудови XY, 3D-модель щелепи може отримати раціональну орієнтацію з досить високою ефективністю реалізації АМ-процесів пошарової побудови.

5.10 Розміщення 3D-моделей у робочому просторі

Рішення задачі ефективного використання робочого простору АМ- установки виконувалося у підсистемі раціонального розміщення виробів в робочому просторі пошарової побудови. Екранну форму підсистеми представлено на рис. 5.35. Передбачено наступні режими формування композиції 3D-моделей виробів у робочому просторі АМ- установки:

- ручний;
- з використанням імовірнісного методу (метод Монте-Карло);
- з використанням генетичного алгоритму (визначення координат розміщення і кутів повороту 3D-моделей);
- процедура поліпшення показників розміщення (виконує малі за кроком переміщення 3D-моделей з перевіркою коректності розміщення).

Незалежно від обраного режиму роботи в даній підсистемі передбачено можливість вибору групи 3D-моделей виробів (передбачений груповий вибір STL-файлів) та автоматичне формування воксельних моделей (списку *List <base_model>*) з включенням у чергу 3D-моделей для розміщення. Опис класу *base_model* представлено в дод. Б.13. Розміри робочого простору установки і параметри розміщення задаються в основних налаштуваннях системи, доступ до яких є на головній формі. Екранну форму основних налаштувань системи представлено на рис. 5.36.

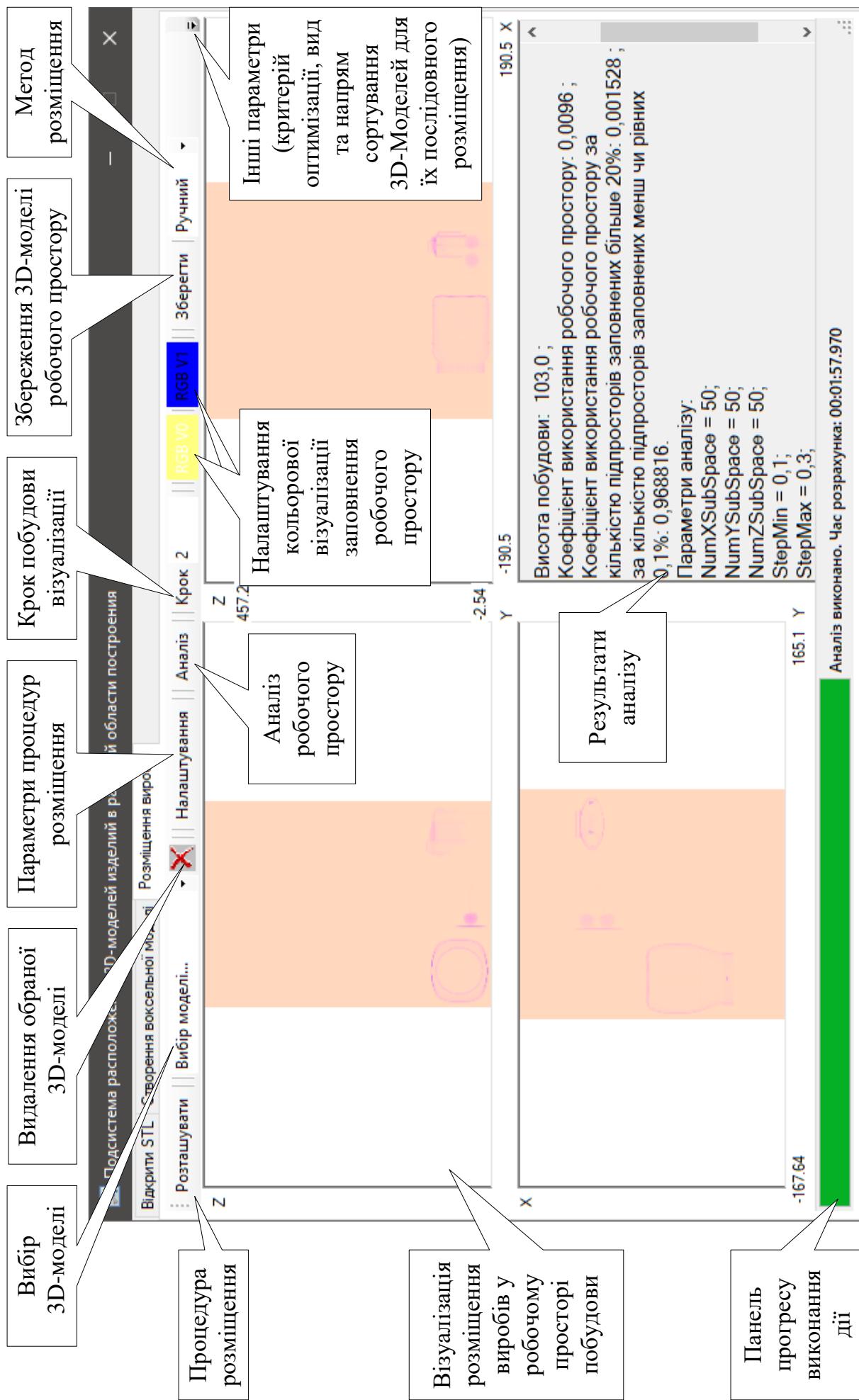


Рисунок 5.35 – Підсистема розміщення виробів у робочому просторі пошарової побудови

Налаштування системи

Опис параметру	Перемінна	Значення	Тип змінної
Система FoxPro	FoxProPath	d:\Vfp50_D_Out_User\0_VFP9\vfp9.exe	Шлях до файлу
Програма Book	BookPath	d:\Vfp50_D_Out_User\Book\Book.app	Шлях до файлу
Система "Створення триангуляційних моделей"	Base_TriPath	d:\Vfp50_D_Out_User\Base_Tri\Base_Tri.app	Шлях до файлу
Система "Морфологічний аналіз триангуляційних моделей"	Anal_MorPath	d:\Vfp50_D_Out_User\Anal_Mor\Anal_Mor.app	Шлях до файлу
Система "Інтегровані генеративні технології (класифікація техно...)	RP_TechnPath	d:\Vfp50_D_Out_User\RP_Techn\RP_Techn.app	Шлях до файлу
Система "Статистичне моделювання робочих процесів інтегрована...	Stat_Mod	d:\Vfp50_D_Out_User\Stat_Mod\Stat_Mod.app	Шлях до файлу
Програма для перегляду STL	GLC_PlayerPath	d:\App_0P\GLC_Player_2_2_0\glc_player.exe	Шлях до файлу
Програма Magics	MagicsPath	C:\Program Files\Materialise\Materialise Magics ...	Шлях до файлу
Програма Excel	ExcelPath	C:\Program Files (x86)\Microsoft Office\Office12\...	Шлях до файлу
Точність порівняння координат вершин	RoundingKoord	0.0001	float
Дискретність завдання координат по осі Z	PositionResolution	0.01	float
Багатопотокова обробка даних	Multithreading	False	bool
Назва установки	NameEquipment	Vanguard S12 SLS	string
Безпечна відстань між моделями	SafeDistanceBody	5	float
Безпечна відстань до меж платформи	SafeDistanceBorder	25	float
Максимальна координата по осі X робочої платформи	WorkXmax	190.5	float
Мінімальна координата по осі X робочої платформи	WorkXmin	-190.5	float
Максимальна координата по осі Y робочої платформи	WorkYmax	165.1	float
Мінімальна координата по осі Y робочої платформи	WorkYmin	-167.64	float
Максимальна координата по осі Z робочої платформи	WorkZmax	457.2	float
Мінімальна координата по осі Z робочої платформи	WorkZmin	-2.54	float

Кількість параметрів 24 Значення за замовчуванням (default) Зберегти налаштування

Рисунок 5.36 – Екранна форма загальних налаштувань системи

Величини переміщення поточної 3D-моделі

Кути повороту поточної 3D-моделі

Положення січної площини для декомпозиції 3D-моделі

Видалення вихідної 3D-моделі після декомпозиції

Автоматичне розміщення

Рядок стану

Кількість варіантів розміщення

Параметри генетичного алгоритму

Кількість підпросторів

Граничне заповнення підпросторів для підрахунку порожніх і заповнених

Крок побудови

Параметри стратегії змінного кроку побудови

Вибір стратегій побудови

Абсолютні / відносні значення

Виконання декомпозиції

Наступна модель за списком

Крок переміщення 3D-моделі

Коефіцієнт значущості цільової функції відносно функції штрафів

Параметри трансформації 3D-моделі, розміщення та аналізу

Параметри переміщення, повороту та декомпозиції 3D-моделі

Параметри розміщення на платформі

Застосувати

Перевірити

Наступна

Дія не виконано.

Метод Монте-Карло та процедура підвищення ефективності використання робочого простору

Варіантів 5 Перевірка п-го вокселя 5 Крок по осям XY 3

Спроб розміщ. 10 Крок по осі Z 5 Переміщення по осях XY

Генетичний алгоритм

Скрещення 0.80 Кільк. генерацій 50 Розмір генома 3

Популяція 20 Мутація 0.020 Значимість критерія 0.6

Параметри аналізу розміщення 3D-моделей

Кільк. підпростр. Заповненість підпростр. Парам. розсічення Пост. крок Фракт.аналіз

X 3 Порожнє 0.001 Крок макс. 0.300 Змінний крок Мін. 3

Y 3 Заповнене 0.250 Пояїбка 0.100 Без усцен. Кіль. 3

Z 3 Крок побуд. 0.100 Учення.% 5.0 Зусіянням Множ. 2

Рисунок 5.37 – Екранна форма налаштувань підсистеми розміщення 3D-моделей у робочому просторі АМ-установки

5.10.1 Ручний режим

У ручному режимі викликається екранна форма налаштувань підсистеми (представлена на рис. 5.37), за допомогою якої можливо виконання таких дій:

- попереднє розміщення в автоматичному вигляді підготовленої групи 3D-моделей;
- послідовний вибір 3D-моделі в якості поточної для виконання трансформацій;
- переміщення поточної 3D-моделі;
- реорієнтація поточної 3D-моделі поворотом на заданий кут навколо осей X , Y , Z локальної системи координат, розміщеної у центрі її ваги;
- виконання декомпозиції шляхом розсічення заданими площинами (вибирається площа, перпендикулярна осі X , Y , Z і її положення у відносних або абсолютних величинах);
- перевірка коректності розміщення 3D-моделей (забезпечення умови потрапляння в робочий простір, дотримання допустимих відстаней до країв платформи і між 3D-моделями виробів).

Використання ручного режиму дозволяє з мінімальними тимчасовими витратами виконувати порівняльний аналіз ефективності різних підходів та алгоритмів розміщення 3D-моделей в залежності від конструктивних особливостей виробів.

З метою підвищення ефективності використання робочого простору АМ-установок слід розглянути наступні відомі алгоритми [306]:

- рівневі (*level*);
- шельфові (*shelf*);
- пласкі (*plane*).

Дані алгоритми добре опрацьовані на прикладах двовимірної задачі розміщення (упаковки, розкрою) [307, 308]. Деякі підходи з достатньою часткою впевненості можна використовувати для вирішення тривимірної задачі розміщення.

Алгоритми розміщення 3D-моделей строго впритул один до одного, як показує практика, не належать до ефективних. Можна розміщувати вироби як в алгоритмах, які відносяться до рівневих [306, 307]. В таких алгоритмах простір ділять на підпростори за висотами, що підбираються за одним з вибраних виробів. Як правило, обирають найбільший за розмірами із обмеженої групи виробів, що поміщається безпосередньо на платформі АМ-установки. Потім розміщаються всі інші вироби на конкретному рівні за заданим критерієм. Наприклад, в шельфових алгоритмах зумовлюють відразу кілька "полиць" і в паралельному процесі за кожним з них розміщують вироби.

Переважно список 3D-моделей виробів, підготовлених для розміщення, сортується за зменшенням розмірів (за середньоарифметичним значенням габаритних розмірів по осіх X , Y , Z) або за об'ємом. Характеристику 3D-моделей, за якою слід виконувати попереднє сортування, слід вибирати в залежності від конструкції виробів. Для тонкостінних конструкцій і з невеликим коефіцієнтом відносного заповнення об'єму слід обирати перший варіант. Другий варіант характеристики є кращим для виробів, які, як правило, відносяться до типових для машинобудування (вал, шестерня і т.д.).

Рекомендується розміщення починати від країв робочого простору, тобто від кута платформи. Наступні вироби розташовуються у певному напрямку на заданому рівні по осі Z . Виріб, який не вдалося розмістити на рівні (з дотриманням умов розміщення), поміщається на наступний рівень (переміщенням по осі Z) і так далі. Так як на нижніх рівнях буде виникати вільний простір, то кожен виріб слід перевіряти на можливість його розміщення там. Декомпозицію виробів з метою розміщення у вільний простір слід використовувати як останній варіант вирішення задачі розміщення. При цьому слід спочатку розглядати з найменших, а потім з найбільших за об'ємом вільних областей простору.

Після заповнення вільних областей робочого простору є можливим утворення двох або більше таких областей, що мають менші об'єми. Це слід враховувати особливо в разі, коли стойть завдання найбільшої кількості

розміщуваних 3D-моделей виробів у робочому просторі.

5.10.2 Метод Монте-Карло

З урахуванням існуючих підходів запропоновано за методом Монте-Карло виконувати розміщення 3D-моделей виробів у робочому просторі з покроковою (безперервною) перевіркою на вільний простір.

Сортuvання моделей виконувалося за збільшенням або зменшенням величини обраної характеристики із наступних: об'єм моделі, коефіцієнт використання робочого простору, середньоарифметичної величини габаритних розмірів, мінімальних або максимальних габаритних розмірів.

Розміщення 3D-моделей виробів у робочому просторі виконується шляхом послідовного генерування координат з урахуванням розмірів робочого простору та габаритних розмірів виробу і перевірки на коректність розміщення. При цьому випадково генерується за законом рівномірного розподілу дві величини x_{ci} , y_{ci} для координат по осіах X , Y . Величина координати по осі Z задається з умови мінімально допустимого розміщення у робочому просторі Z_{Amin} з урахуванням наявності раніше розміщених 3D-моделей. Оцінка мінімально допустимого розміщення поточної 3D-моделі виконується крок за кроком Δ_z від координати Z_{min} (мінімальної величини по координатній осі Z робочого простору). За умовчанням крок Δ_z береться рівним розміру вокселя 3D-моделі. Такий підхід дозволяє найкращим способом розмістити одержувані вироби незалежно від їхньої складності. Зворотною стороною є збільшення часових ресурсів на визначення допустимого розміщення 3D-моделі.

Запропонований алгоритм не дозволяє отримувати стабільний результат через свої особливості. Збільшення кількості порівнюваних варіантів розміщення дозволяє отримувати показники, близькі для ручного режиму, але при цьому збільшується час розрахунків. Тому рекомендується ставити не більш як 5 варіантів розміщення. Кількість спроб визначення вільного простору при розміщенні чергової 3D-моделі слід задавати $N_{search} = 5 \div 50$ разів. Кількість N_{search} залежить від кількості виробів, які необхідно розмістити, та від

співвідношення розмірів їхніх та робочого простору. При цьому важливим є геометрична складність виробів, а особливо значення коефіцієнту заповнення робочого простору.

Відповідно до наведеного алгоритму (рис. 5.38) розміщення 3D-моделей виробів виконується з найменшими тимчасовими ресурсами в порівнянні з іншими варіантами (алгоритмами), що дозволяє істотно скоротити терміни на технологічну підготовку.

Перевірка і дослідження працездатності розробленого алгоритму виконувалося на прикладі розміщення групи виробів. На початку використовувалася група з трьох 3D-моделей виробів:

- вал (габаритні розміри 60x216x60, кількість граней $N_{tr} = 147\ 610$ шт., $N_{vox} = 47\ 172$ шт. при розмірі вокселя 2 мм за всіма осями);
- корпус (габаритні розміри 210x210x125, $N_{tr} = 3\ 010$ шт., $N_{vox} = 115\ 029$ шт.);
- шнек (габаритні розміри 40x144x40, $N_{tr} = 10\ 366$ шт., $N_{vox} = 7\ 978$ шт.).

Апробація виконувалася для трьох варіантів попереднього сортування 3D-моделей. Статистичні характеристики (мінімальне, максимальне і середнє значення) досліджених ознак для отриманих 60-и варіантів розміщення 3D-моделей в робочому просторі пошарової побудови наведено у табл. 5.5 і 5.6. Розміри робочого простору задавались на прикладі установки *Vanguard Si2 SLS* (див. розд. 2). Аналіз просторового розподілу матеріалу виробів виконувався при розбитті на 10 підпросторів по кожній з координатних осей X , Y , Z . Оцінка продуктивності виготовлення розглядалась за кількістю шарів побудови. Стратегія розсічення зі змінним кроком побудови виконувалась при наступних характеристиках: крок $h_i \in [0,1; 0,3]$ мм; гранично допустимій величині відхилення від правильної форми $\Delta_{Smax} = 0,1$ мм; усіченні розподілу кутів між нормалями поверхонь і координатною віссю Z - $\Delta\varphi_{NZ} = \{0; 5\}$ %. Критерій оптимізації розміщення – висота побудови H_B .

Розміщення 3D-моделей за методом Монте-Карло не завжди дозволяло отримувати раціональні варіанти розміщення. При виконанні статистичного

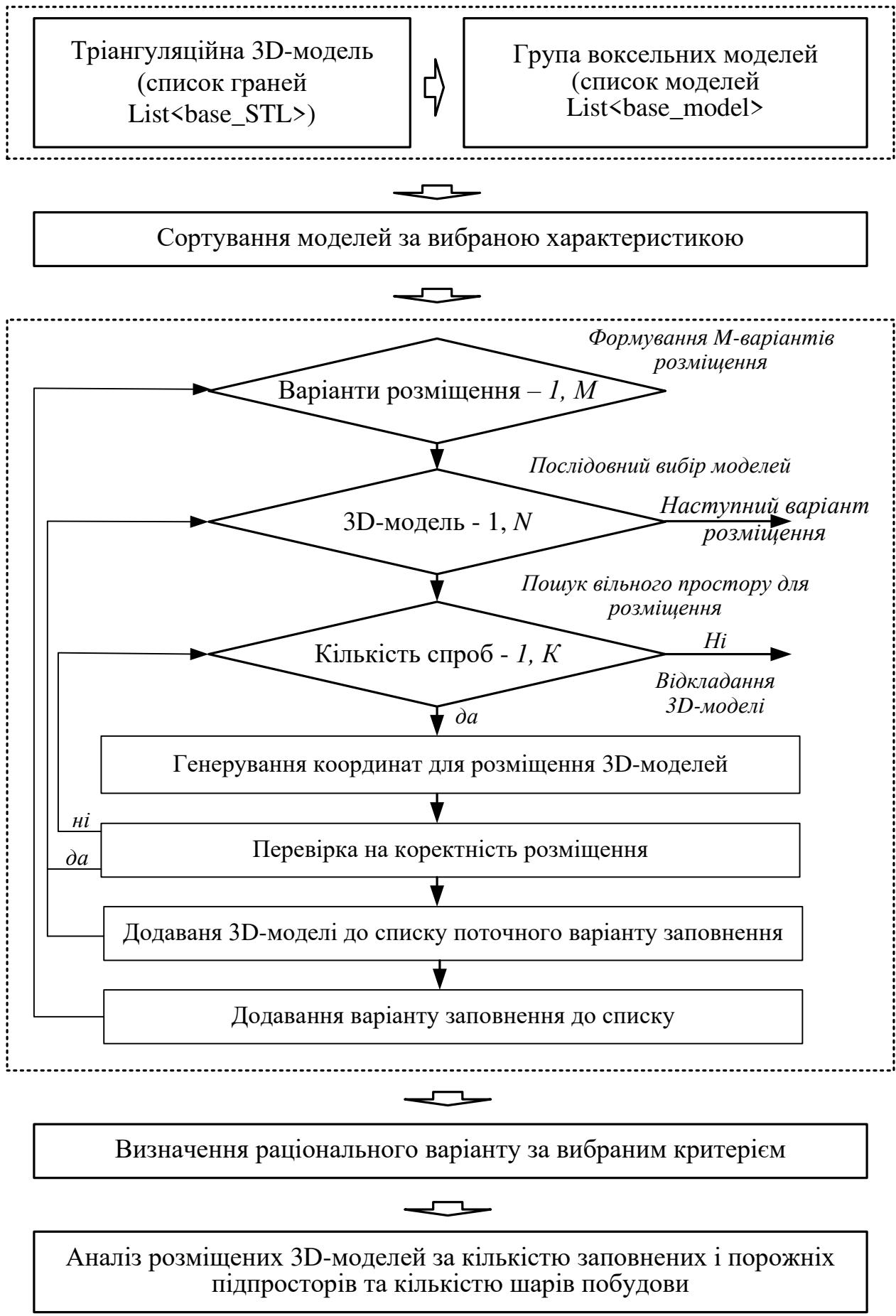


Рисунок 5.38 – Алгоритм розміщення 3D-моделей виробів у робочому просторі за методом Монте-Карло

аналізу досліджених ознак явно невдалі варіанти розміщення «відкидалися», тобто не враховувалися. Таких варіантів виявлено менше 10% від загальної кількості.

Таблиця 5.5 - Статистичні характеристики досліджених ознак використання робочого простору, отриманих при аналізі варіантів розміщення 3D-моделей з використанням методу Монте-Карло

Вид сортування 3D-моделей	Статистичні характеристики	Висота побудови H_B , мм	Коефіцієнт використання робочого простору, K_V	Відносна кількість заповнених підпросторів	
				> 20%	< 1%
Без сортування	$\{x\}_{min}$	131,0	0,059	0,018	0,669
	$\{x\}_{max}$	183,0	0,082	0,039	0,798
	\bar{x}	167,9	0,065	0,028	0,767
Збільшення об'єму	$\{x\}_{min}$	127,0	0,059	0,019	0,714
	$\{x\}_{max}$	182,0	0,085	0,039	0,802
	\bar{x}	163,4	0,067	0,027	0,765
Зменшення об'єму	$\{x\}_{min}$	127,0	0,085	0,003	0,653
	$\{x\}_{max}$	127,0	0,085	0,021	0,734
	\bar{x}	127,0	0,085	0,012	0,712

Таблиця 5.6 - Статистичні характеристики кількості шарів побудови, одержаних при аналізі варіантів розміщення 3D-моделей з використанням методу Монте-Карло

Вид сортування 3D-моделей	Статистичні характеристики	Кількість шарів побудови при стратегії пошарової побудови		
		Постійний крок	Змінний крок	
			$\Delta \phi_{NZ} = 0 \%$	$\Delta \phi_{NZ} = 5 \%$
Без сортування	$\{x\}_{min}$	1290	863	799
	$\{x\}_{max}$	1810	1105	1028
	\bar{x}	1659	1036	963
Збільшення об'єму	$\{x\}_{min}$	1251	856	769
	$\{x\}_{max}$	1800	1092	1025
	\bar{x}	1614	1018	942
Зменшення об'єму	$\{x\}_{min}$	1251	807	717
	$\{x\}_{max}$	1251	929	820
	\bar{x}	1251	861	780

За даними статистичного аналізу, наведеними в табл. 5.5 і 5.6, виявлено істотний вплив виду попереднього сортування 3D-моделей на показники

просторового розміщення та пошарового розсічення. Сортuvання 3D-моделей за зменшенням їхнього об'єму дає кращі результати, але при цьому спостерігалося деяке збільшення часу розрахунків.

З метою оцінки можливостей даного алгоритму розміщення додатково формувався робочий простір АМ-установки для одержання 6-и виробів. До трьох вище представлених 3D-моделей додано наступні:

- ємність (габаритні розміри 102x93,6x125,5 мм³, кількість граней $N_{tr} = 34\ 424$ шт., кількість вокселей $N_{vox} = 68\ 613$ шт. при розмірі вокселя 1 мм по всіх осіях);

- кришка (83,9x101,3x43,2 мм³, $N_{tr} = 15\ 352$ шт., $N_{vox} = 33\ 998$ шт.);
- сувенір (73x51,3x70,1 мм³, $N_{tr} = 8\ 090$ шт., $N_{vox} = 19\ 847$ шт.).

Середньоарифметичні величини характеристик досліджених ознак 3-х варіантів по кожному набору параметрів розміщення 3D-моделей у робочому просторі пошарової побудови наведено у табл. 5.7 і 5.8. У всіх випадках попереднє сортuvання 3D-моделей виконувалося зі зменшенням їх об'єму.

Таблиця 5.7 - Статистичні характеристики досліджених ознак використання робочого простору, отриманих при аналізі варіантів розміщення 3D-моделей з використанням методу Монте-Карло

Кількість спроб розміщення, N_{search}	Висота побудови H_B , мм	Коефіцієнт K_V	Відносна кількість заповнених підпросторів	
			> 20%	< 1%
4	183,0	0,0682	0,023	0,707
5	162,7	0,074	0,022	0,686
6	151,0	0,0796	0,033	0,669
7	171,0	0,0701	0,025	0,691
8	169,3	0,0724	0,027	0,678
9	156,0	0,0769	0,028	0,674
10	158,7	0,0762	0,021	0,695
20	150,3	0,0788	0,024	0,690
30	147,0	0,0814	0,020	0,691
40	153,7	0,0772	0,021	0,697
50	140,3	0,0846	0,017	0,680

Дані табл. 5.7 і 5.8 демонструють явне поліпшення досліджених показників зі збільшенням числа спроб розміщення N_{search} (пошуку вільного простору) для кожного кроку зміни координати розміщення по осі Z. Дані тенденція має ймовірнісний характер опису даних залежностей.

Таблиця 5.8 - Статистичні показники кількості шарів побудови, отриманих при аналізі варіантів розміщення 3D-моделей з використанням методу Монте-Карло

Кількість спроб розміщення, N_{search}	Кількість шарів побудови при стратегії пошарової побудови		
	Постійний крок	Змінний крок	
		$\Delta \varphi_{NZ} = 0 \%$	$\Delta \varphi_{NZ} = 5 \%$
4	1812	1310	1145
5	1605	1332	1106
6	1489	1240	1019
7	1689	1315	1121
8	1672	1282	1121
9	1539	1256	1073
10	1572	1273	1078
20	1489	1171	999
30	1456	1175	984
40	1523	1244	1070
50	1389	1151	963

Визначення кількості шарів побудови групи виробів у залежності від числа N_{search} (табл. 5.8) дає можливості визначити практичні рекомендації по використанню даного алгоритму, що мають рацію для розглянутої групи виробів.

Одержані результати підтверджують достатню ефективність алгоритму з використанням методу Монте-Карло на прикладі невеликої групи виробів.

У наступному підрозділі розглянуто наступний алгоритм розміщення 3D-моделей у робочому просторі.

5.10.3 Генетичний алгоритм

В адитивних технологіях при вирішенні оптимізаційних задач найбільш прийнятним є генетичний алгоритм [225, 247, 251]. Алгоритм розміщення 3D-моделей у робочому просторі з використанням генетичного алгоритму

представлено в розд. 4. У вирішенні задачі розміщення об'єктів (3D-моделей), як правило, орієнтацію 3D-моделей фіксують. Тому розглянуто вирішення задачі розміщення з заданими кутами повороту 3D-моделей, визначених при вирішенні задачі раціональної орієнтації виробів у робочому просторі.

У розробленій системі в якості критерію оптимізації при формуванні групи розміщених 3D-моделей в робочому просторі розраховується наступна функція:

$$f(x) = f(M(P)) \cdot K_f - F_p - F_{cp}, \quad (5.16)$$

де $f(M(P))$ - цільова функція, що розраховує висоту побудови $H_B(M(P))$,

відносне заповнення робочого простору 3D-моделями $K_V(M(P))$ або

коєфіцієнт ефективності використання робочого простору (що враховує розподіл матеріалу за підпросторами) $K_W(M(P))$, представлено в розд. 4;

K_f - коєфіцієнт посилення цільової функції, що дозволяє задати раціональне співвідношення між складовими функції для усунення проблеми коректного розміщення;

F_p - штрафна функція;

F_{cp} - складова, що визначається сумою величин генів у генетичному алгоритмі.

Штрафна функція, введена з метою забезпечення коректного розміщення 3D-моделей та визначена кількістю «конфліктних» вокселей, тобто тих, що мають некоректне розміщення (відстань між вокселями двох 3D-моделей, що підлягають перевірці, менше мінімально допустимої відстані):

$$F_p = \sum_{i=1, j=1}^{n \cdot m} n_v, \quad (5.17)$$

$$n_v = \begin{cases} 1, & \text{якщо } (v_i.x - v_j.x)^2 + (v_i.y - v_j.y)^2 + (v_i.z - v_j.z)^2 \leq \Delta_{M \min}^2, \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases}$$

де n, m - кількість вокселей 3D-моделей, що проходять перевірку;

n_v - коефіцієнт наявності «конфлікту» розміщення вокселей;

$\Delta_{M \min}$ - мінімально допустима відстань між i -ю та j -ю моделями.

Складова функції F_{cp} дозволяє усунути проблему відсутності оптимуму в функції $f(M(P))$ або наявності пласких ділянок на поверхні відгуку, з якими генетичний алгоритм «погано» працює. Введення даної складової дозволило істотно зменшити час розрахунків (в 5÷20 разів) і неможливості визначення в ряді випадків оптимальних значень. Особливо це проявляється для груп 3D-моделей, які необхідно отримати за одне завантаження установки, з великою різницею габаритних розмірів. Визначається F_{cp} наступним чином:

$$F_{cp} = \sum_{g=1}^G value[g],$$

де G - кількість генів, задавалося $G = 3\div 6$;

$value[g]$ - масив випадкових величин, що генеруються в процесі виконання генетичного алгоритму, $value[g] \in [0, 1]$.

Цільова функція може являти собою вектор з компонентами за кожним критерієм оптимізації $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ з метою забезпечення багатокритеріальної оптимізації [309]. В цьому випадку використовуються вагові коефіцієнти $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$, що визначають відносну цінність кожного критерію. Критерії в свою чергу нормуються з метою усунення відмінностей в масштабі величин за такою залежністю [204, 205]:

$$x'_i = \frac{x_i}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (5.18)$$

де x_{\min}, x_{\max} - мінімальна і максимальна величина дослідженої ознаки.

Модуль вектора узагальненої цільової функції розраховується за відомою залежністю [206]:

$$F = \sqrt{\sum_{i=1}^n f'_i(x)^2}. \quad (5.19)$$

Апробація алгоритму виконувалася для трьох варіантів попереднього

сортування 3D-моделей. Статистичні характеристики (мінімальне, максимальне і середнє значення) досліджених ознак для отриманих 30-и варіантів розміщення 3D-моделей в робочому просторі пошарової побудови наведено в табл. 5.9 і 5.10. Умови, параметри розміщення та аналізу задавалися такі ж які в попередньому підрозділі. Параметри генетичного алгоритму: ймовірність схрещування $p_c = 80\%$, ймовірність мутації $p_m = 1 \div 2\%$, розмір популяції $N_p = 20 \div 50$ осіб, гранична кількість генерацій (поколінь) $N_g = 50 \div 100$, розмір генному $n_{genom} = 3$, коефіцієнт посилення критерію оптимізації $K_{op} = 1$.

Аналіз досліджених ознак, наведених в табл. 5.9, 5.10, показує явну перевагу сортування 3D-моделей щодо зменшення об'єму (габаритних розмірів).

Таблиця 5.9 - Статистичні характеристики досліджених ознак використання робочого простору, отриманих при аналізі варіантів розміщення 3D-моделей з використанням генетичного алгоритму

Вид сортування	Статистичні характеристики	Висота побудови, H_B , мм	Коефіцієнт використання робочого простору, K_V	Відносна кількість підпросторів заповнених	
				> 80%	< 1%
Без сортування	$\{x\}_{min}$	125,36	0,054	0,227	0,660
	$\{x\}_{max}$	198,39	0,086	0,340	0,773
	\bar{x}	164,80	0,067	0,279	0,721
Збільшення об'єму	$\{x\}_{min}$	164,47	0,036	0,158	0,706
	$\{x\}_{max}$	300,95	0,066	0,294	0,842
	\bar{x}	209,86	0,054	0,234	0,766
Зменшення об'єму	$\{x\}_{min}$	132,56	0,058	0,225	0,682
	$\{x\}_{max}$	186,62	0,082	0,318	0,775
	\bar{x}	148,14	0,074	0,286	0,714

Таблиця 5.10 - Статистичні показники кількості шарів побудови, отриманих при аналізі варіантів розміщення 3D-моделей з використанням генетичного алгоритму

Вид сортування	Статистичні характеристики	Кількість шарів побудови при стратегії		
		Постійний крок	Змінний крок	
			$\Delta \varphi_{NZ} = 0 \%$	$\Delta \varphi_{NZ} = 5 \%$
Без сортування	$\{x\}_{min}$	1250	900	809
	$\{x\}_{max}$	1909	1172	1111
	\bar{x}	1612	1079	994
Збільшення об'єму	$\{x\}_{min}$	1576	1133	1051
	$\{x\}_{max}$	2990	1534	1494
	\bar{x}	2069	1278	1213
Зменшення об'єму	$\{x\}_{min}$	1250	855	775
	$\{x\}_{max}$	1658	1074	1017
	\bar{x}	1367	951	866

У разі завдання розміру популяції $N_p = 50$ відсутність сортування нівелюється і забезпечується одержання достатньо раціональних варіантів розміщення, тобто усі три 3D-моделі розміщаються безпосередньо на платформі (у мінімально допустимому положенні по координатній осі Z). Оптимальною величиною граничного значення генерацій є $N_g = 50$. Збільшення величини N_g не дає відчутного ефекту (спостерігаються несуттєві зміни досліджених ознак варіанту розміщення). При цьому час розрахунків збільшується.

Збільшення ймовірності мутації до $p_m = 2\%$ дозволяє збільшити ймовірність отримання більш раціональних варіантів розміщення 3D-моделей у робочому просторі.

З метою оцінки можливостей даного алгоритму розміщення додатково формувався робочий простір установки для виготовлення 6-и виробів (характеристики 3D-моделей представлено у попередньому підрозділі).

Значення досліджених ознак для отриманих 24-х варіантів розміщення 3D-моделей в робочому середовищі пошарової побудови наведено у табл. 5.11 і 5.12. У всіх випадках попереднє сортування 3D-моделей виконувалося зі зменшенням їх об'єму.

Виходячи з аналізу даних табл. 5.11 можна зробити деякі очевидні висновки. Досліжені ознаки, одержані для декількох розрахунків при одному варіанті параметрів, демонструють ймовірнісну природу їхнього опису (гістограми розподілу досліджених ознак представлено на рис. 5.39). Виконана оцінка відносної кількості підпросторів, заповнених більше 80%, не дозволяє виявити зміни (тенденції). Завдання порога необхідно проводити з урахуванням конструктивних особливостей виробів. Стосовно до розглянутих виробів допустимою величиною для порога, що визначає необхідну (або достатню) наповненість, є $10 \div 20\%$. Такий поріг задано в подальших дослідженнях.

Дані табл. 5.11 і 5.12 демонструють явне поліпшення досліджених показників зі збільшенням числа осіб у популяції N_p та зменшенням вірогідності мутації p_m . Дані тенденція має імовірнісний характер опису даних

Таблиця 5.11 - Статистичні характеристики досліджених ознак використання робочого простору, отриманих при аналізі варіантів розміщення 3D-моделей з використанням генетичного алгоритму

№	Параметри алгоритму				Висота побудови H_B , мм	Коефіцієнт використання робочого простору, K_V	Відносна кількість підпросторів заповнених	
	$p_c, \%$	$p_m, \%$	N_p	N_g			> 80%	< 1%
1	80	1	20	50	187,54	0,0629	0	0,758
					220,59	0,0534	0	0,743
					230,98	0,0510	0	0,772
2	80	1	30	50	194,21	0,0607	0	0,734
3	80	1	40	50	164,12	0,0718	0	0,721
4	80	1	50	50	185,83	0,0634	0	0,731
5	80	2	20	50	292,17	0,0403	0	0,802
6	80	2	30	50	258,03	0,0457	0	0,778
7	70	2	40	50	255,20	0,0462	0	0,776
8	90	2	50	50	209,39	0,0563	0	0,755
9	80	3	20	50	220,98	0,0533	0	0,782
10	80	3	30	50	167,73	0,0703	0	0,733
11	80	3	40	50	259,11	0,0455	0	0,773
12	90	3	50	50	183,99	0,0641	0	0,735
13	80	1	20	200	177,16	0,0665	0	0,733
14	80	1	30	200	195,68	0,0602	0	0,747
15	80	1	40	200	172,88	0,0682	0	0,731
16	80	1	50	200	188,46	0,0625	0	0,733
17	80	2	20	200	252,08	0,0468	0	0,790
18*	80	2	30	200	231,72	0,0509	0	0,767
19*	80	2	40	200	234,73	0,0502	0	0,761
20*	70	2	50	200	185,40	0,0636	0	0,729
21*	80	3	20	200	267,74	0,0440	0	0,790
22*	80	3	30	200	190,30	0,0619	0	0,749
23*	80	3	40	200	182,40	0,0646	0	0,722
24*	80	3	50	200	182,95	0,0644	0	0,737
25*	70	1	40	50	297,24	0,0396	0	0,796
26*	70	1	40	200	201,44	0,0585	0	0,743
27*	90	1	40	50	284,85	0,0413	0	0,802
28*	90	1	40	200	306,44	0,0384	0	0,790
29*	70	0,5	40	50	267,37	0,0441	0	0,775
30*	70	0,5	40	200	271,30	0,0434	0	0,748
31*	80	0,5	40	50	235,25	0,0501	0	0,768
32*	80	0,5	40	200	223,51	0,0527	0	0,755
33*	90	0,5	40	50	233,39	0,0505	0	0,760
34*	90	0,5	40	200	295,96	0,0398	0	0,796

Примітка. * - Розрахунок виконано для коефіцієнта $K_f = 0,6$.

Таблиця 5.12 - Статистичні показники кількості шарів побудови, отриманих при аналізі варіантів розміщення 3D-моделей з використанням генетичного алгоритму

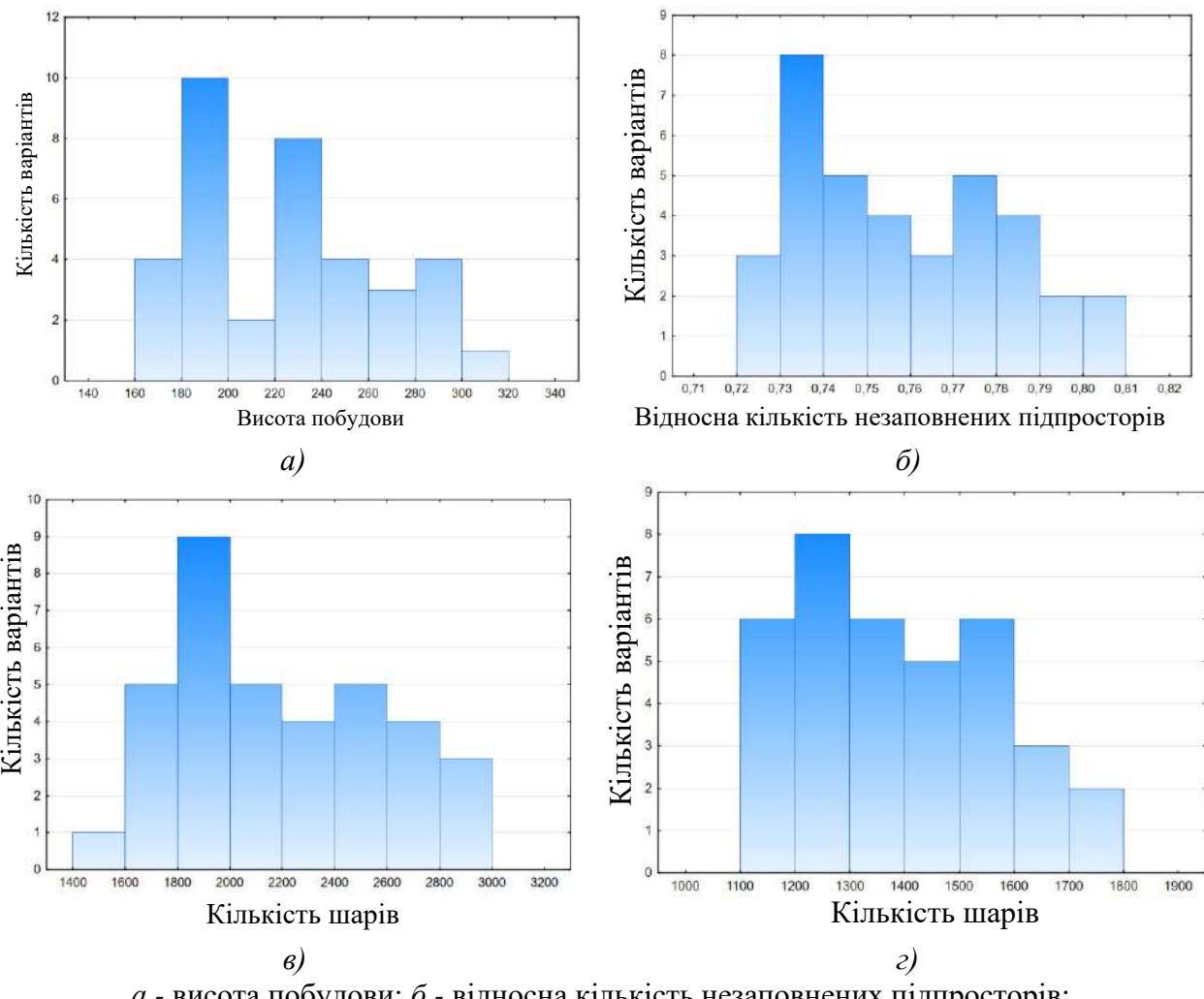
№	Параметри алгоритму				Кількість шарів побудови при стратегії		
	$p_c, \%$	$p_m, \%$	N_p	N_g	Постійний крок	Змінний крок	
						$\Delta \varphi_{NZ} = 0 \%$	$\Delta \varphi_{NZ} = 5 \%$
1	80	1	20	50	1793 2197 2123	1510 1613 1580	1253 1337 1393
2	80	1	30	50	1937	1479	1261
3	80	1	40	50	1614	1336	1120
4	80	1	50	50	1863	1319	1205
5	80	2	20	50	2806	1904	1639
6	80	2	30	50	2562	1790	1574
7	70	2	40	50	2528	1905	1574
8	90	2	50	50	2093	1628	1390
9	80	3	20	50	2198	1789	1447
10	80	3	30	50	1561	1329	1130
11	80	3	40	50	2484	1858	1494
12	90	3	50	50	1827	1364	1168
13	80	1	20	200	1743	1442	1201
14	80	1	30	200	1900	1494	1273
15	80	1	40	200	1716	1417	1237
16	80	1	50	200	1877	1317	1186
17	80	2	20	200	2496	1750	1434
18*	80	2	30	200	2283	1654	1393
19*	80	2	40	200	2331	1675	1455
20*	80	2	50	200	1821	1489	1231
21*	80	3	20	200	2646	1890	1697
22*	80	3	30	200	1867	1290	1157
23*	80	3	40	200	1792	1362	1166
24*	80	3	50	200	1804	1528	1293
25*	70	1	40	50	2714	1826	1594
26*	70	1	40	200	1917	1569	1337
27*	90	1	40	50	2755	2053	1760
28*	90	1	40	200	2982	1986	1757
29*	70	0,5	40	50	2515	1759	1553
30*	70	0,5	40	200	2649	1856	1593
31*	80	0,5	40	50	2331	1756	1514
32*	80	0,5	40	200	2074	1621	1402
33*	90	0,5	40	50	2274	1635	1391
34*	90	0,5	40	200	2935	1779	1622

Примітка. * - Розрахунок виконано для коефіцієнта $K_f = 0,6$.

залежностей, тому її вивчення можливе на основі Байєсівського аналізу [310].

У деяких випадках змінювалася ймовірність схрещування у наступному діапазоні $p_c = 70\div90\%$, що забезпечило отримання коректного розміщення.

На підставі отриманих результатів виявлено раціональні параметри запропонованого алгоритму розміщення. Мала величина ймовірності мутації p_m призводить до більшої кількості невдалих варіантів розміщення, тобто тих, що не забезпечують коректне розміщення 3D-моделей. Особливо це є серйозною проблемою при малій популяції N_p і великій кількості генерацій N_g . Раціональним є величина $N_g = 50$.



a - висота побудови; *б* - відносна кількість незаповнених підпросторів;
в, *г* - кількість шарів побудови при стратегії з постійним і змінним кроком побудови

Рисунок 5.39 - Гістограми розподілу досліджених ознак робочого простору АМ- установки

На рис. 5.40 представлено екранну форму з візуалізацією готового

варіанту заповнення робочого простору групою 3D-моделей, який витримує умови коректності їх розміщення.

Збільшення числа осіб у популяції N_p збільшує істотно час розрахунків, при цьому очікуваного поліпшення показників не демонструється. Кількість поколінь (генерацій) N_g несуттєво впливає на одержувані показники, але дозволяє забезпечувати більшу ефективність роботи генетичного алгоритму.

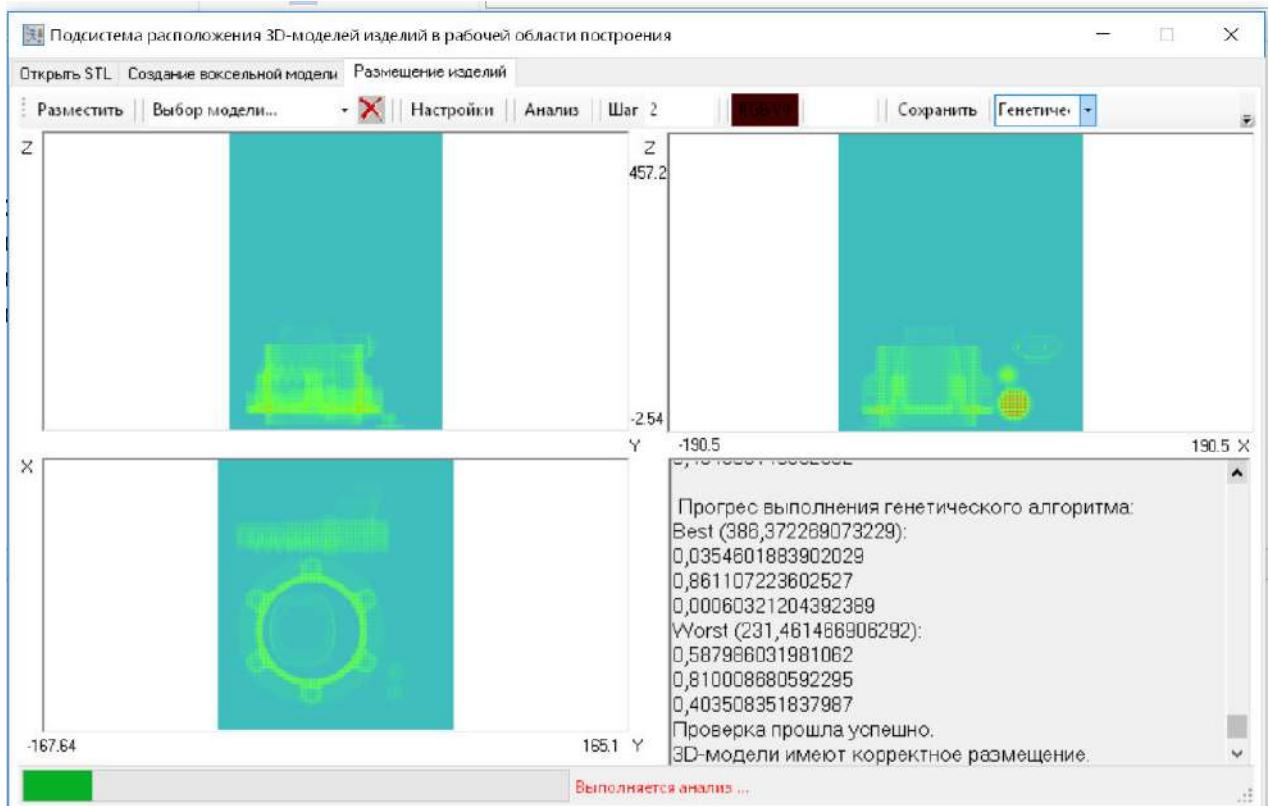
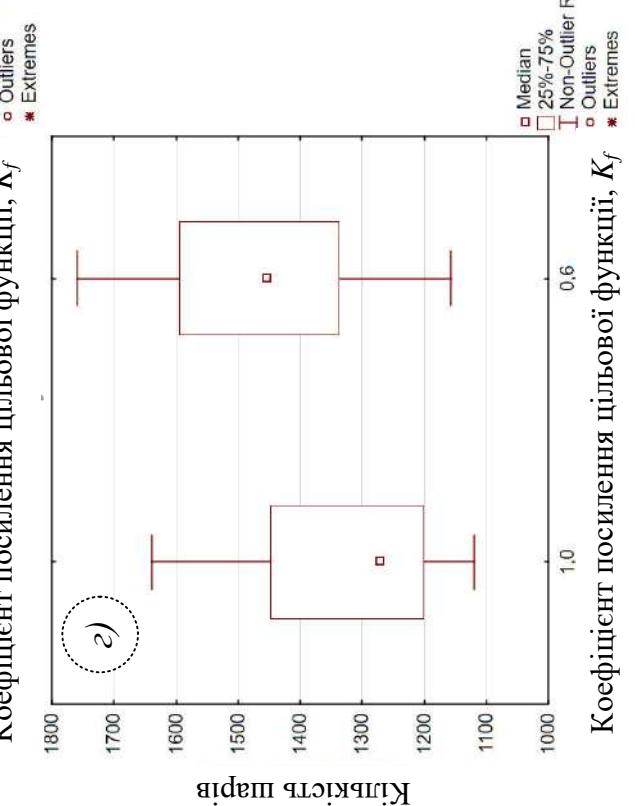
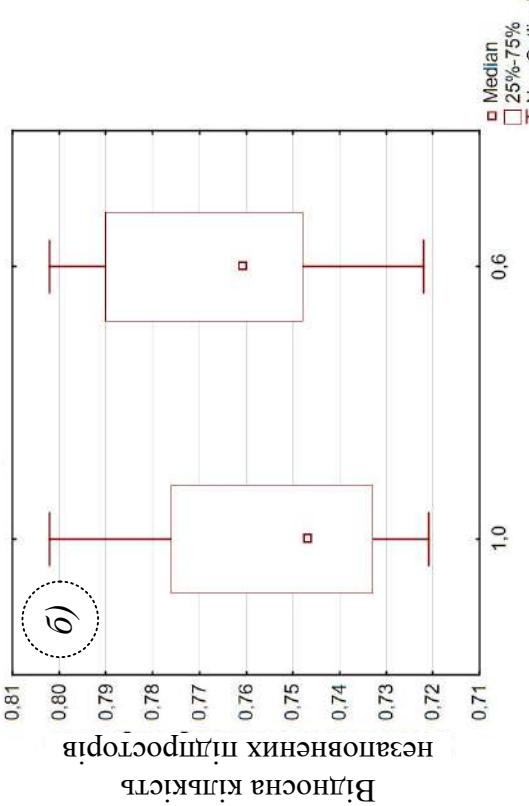
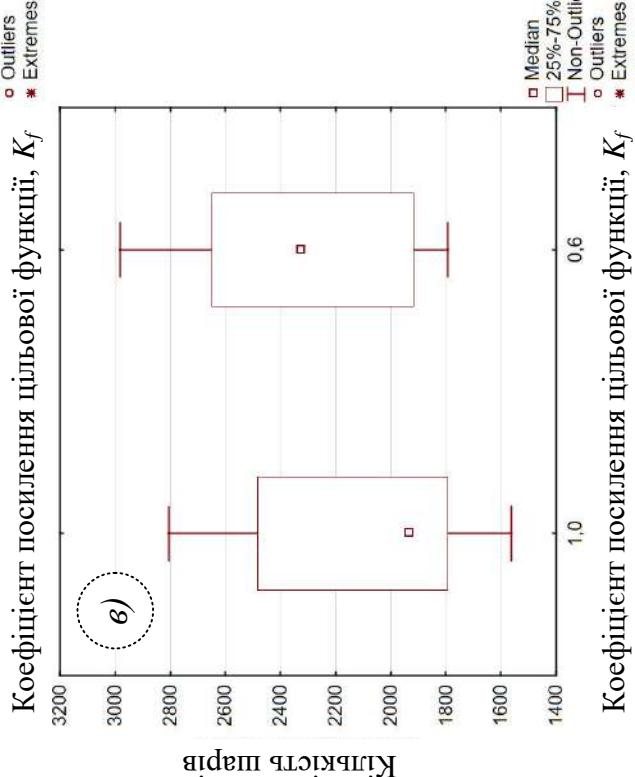
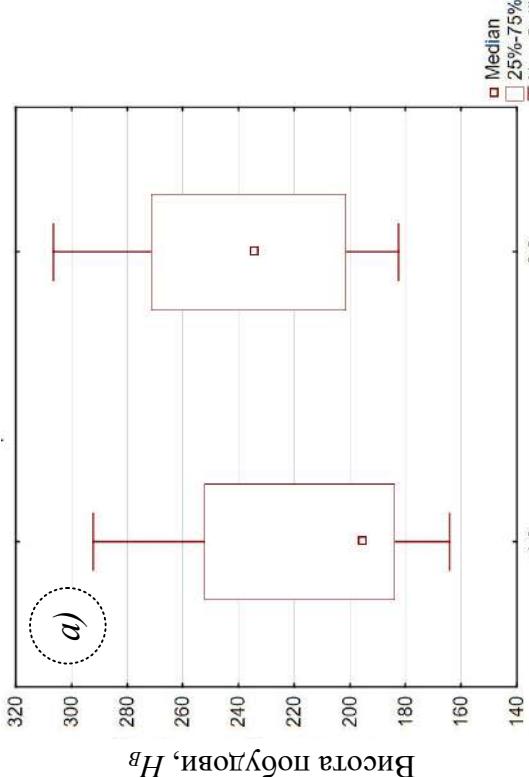


Рисунок 5.40 - Екранна форма з візуалізацією готового варіанту заповнення робочого простору групою 3D-моделей (параметри генетичного алгоритму)

З урахуванням перших 24 варіантів параметрів генетичного алгоритму розглянуто додаткові варіанти з метою підтвердження виявлених їх оптимальних значень. Результати статистичного аналізу досліджуваних показників наведені на рис. 5.41-5.45.

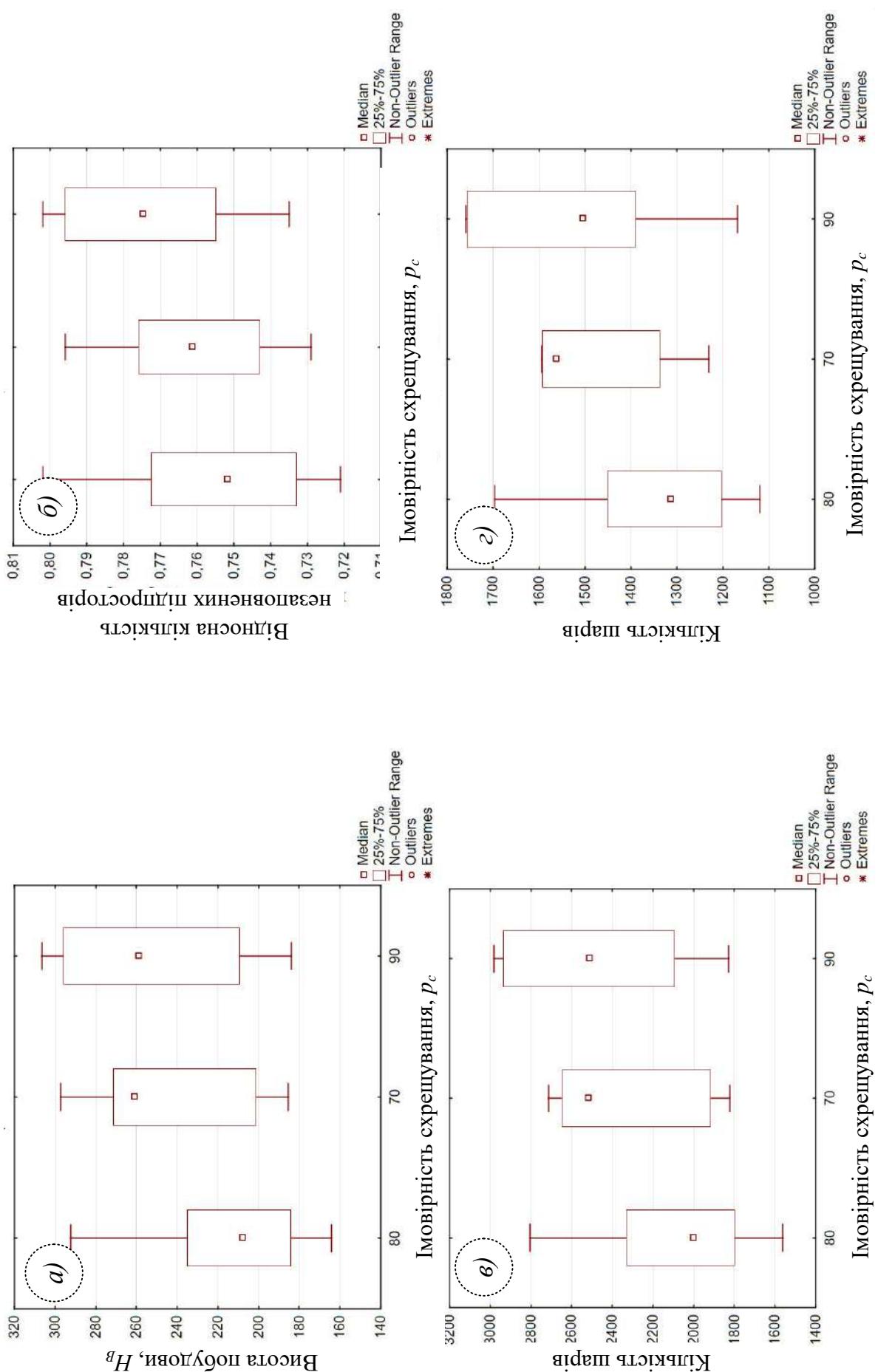
Виявлення оптимального значення коефіцієнта посилення цільової функції K_f представлено на рис. 5.41. Більше за величиною значення коефіцієнта K_f дозволяє отримувати кращі показники досліджених ознак, але при цьому істотно зростає ймовірність отримання некоректного розміщення 3D-моделей. У разі отримання некоректного розміщення, з метою мінімізації



a - висота будови; b - відносна кількість незаповнених підпросторів;

$б, г$ - кількість шарів побудови при стратегії з постійним і змінним кроком побудови

Рисунок 5.41 – Порівняльний аналіз досліджених ознак робочого простору установки за коефіцієнтом посилення цільової функції



a - висота побудови; *b* - відносна кількість незалопнених підпросторів;
2, *2* - кількість шарів побудови при стратегії з постійним і змінним кроком побудови

Рисунок 5.42 – Порівняльний аналіз досліджених ознак робочого простору установки за ймовірністю схрештування

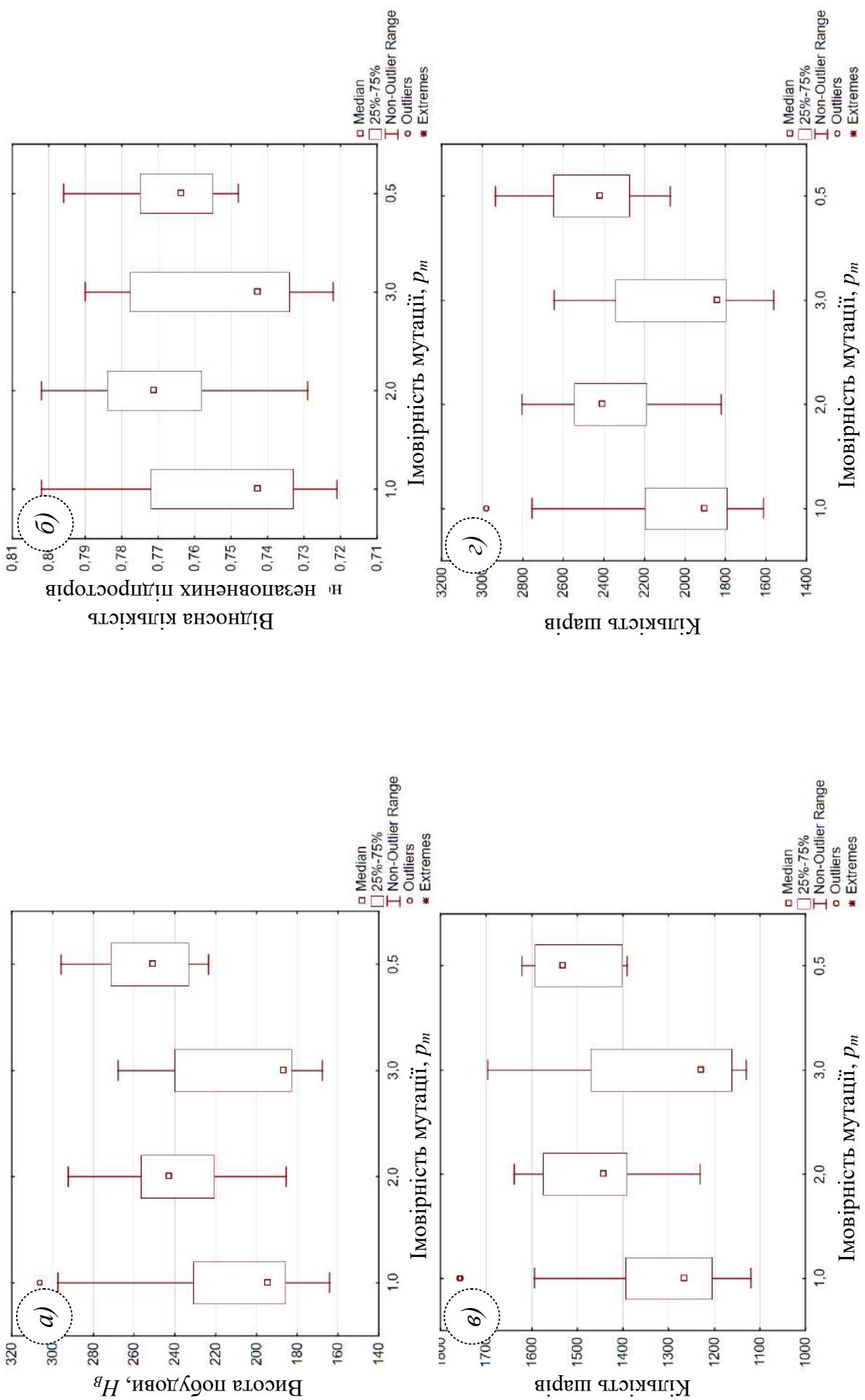


Рисунок 5.43 – Порівняльний аналіз досліджених ознак робочого простору установки за ймовірністю мутації

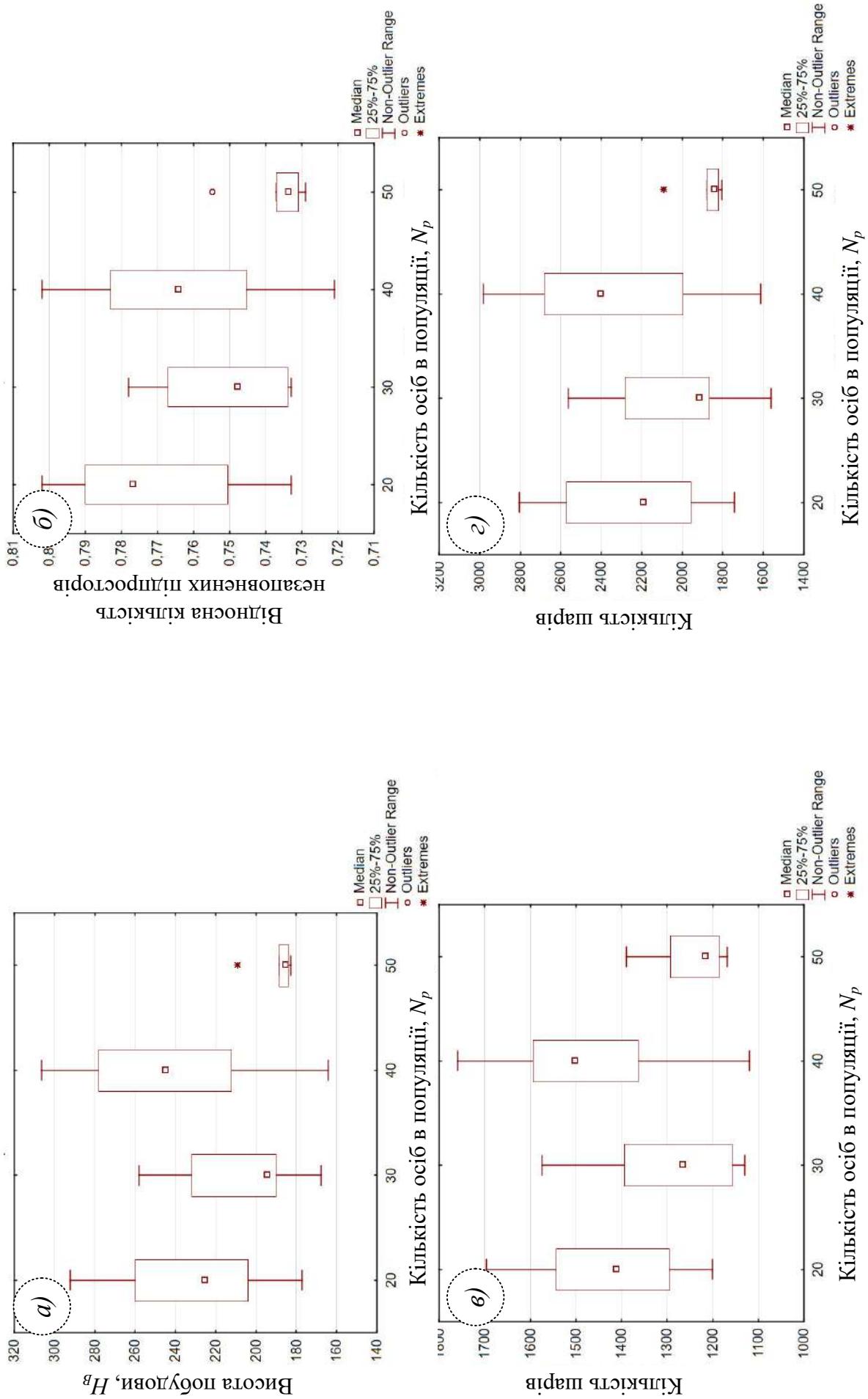
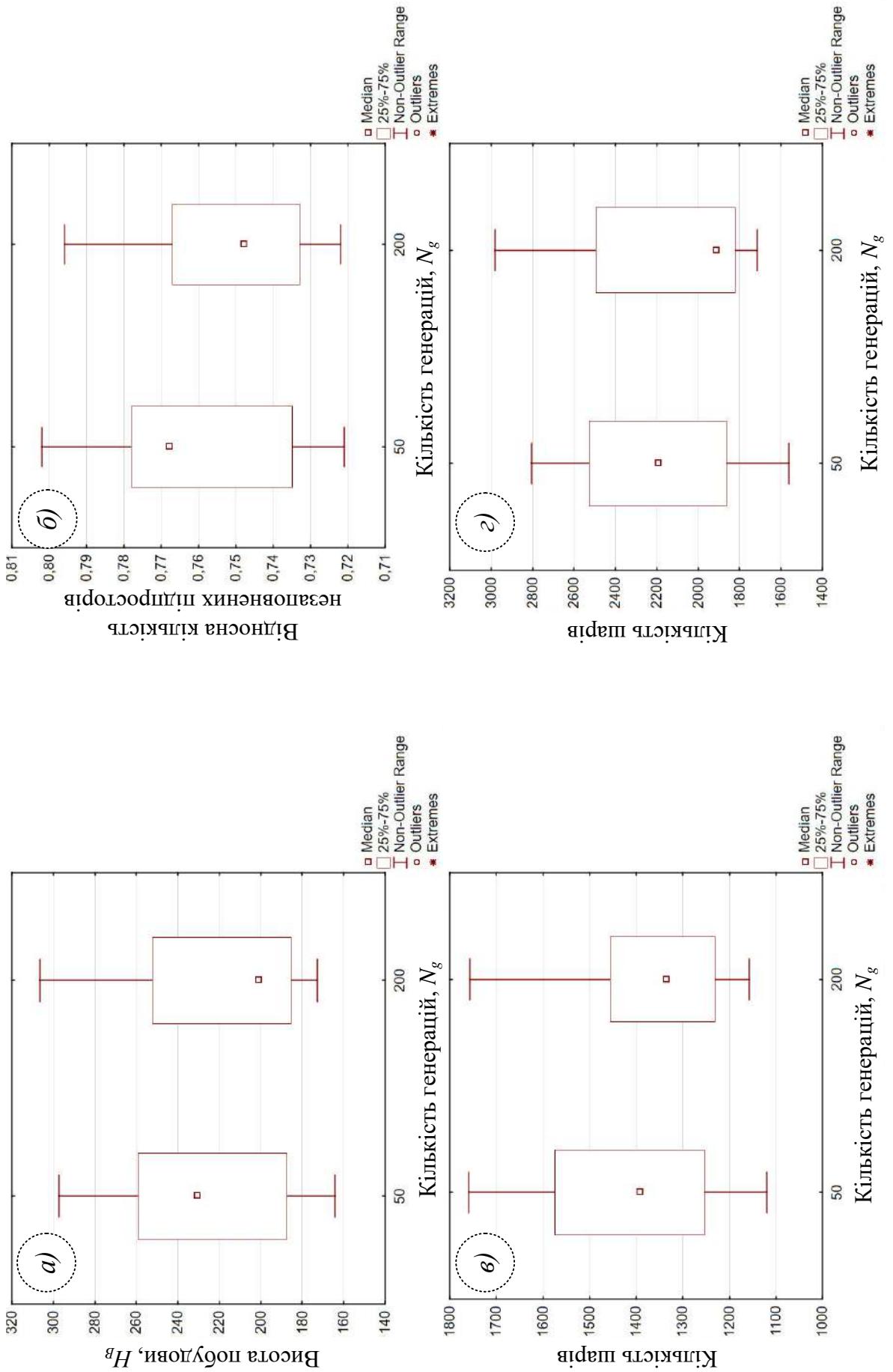


Рисунок 5.44 – Порівняльний аналіз досліджених ознак робочого простору установки за кількістю осіб в популяції



a - висота побудови; *b* - відносна кількість незаповнених підпросторів;
б, *г* - кількість шарів побудови при стратегії з постійним і змінним кроком побудови

Рисунок 5.45 – Порівняльний аналіз досліджених ознак робочого простору установки за кількістю генерацій (поколінь)

витрат часових ресурсів, пропонується не виконувати повторний перерахунок, а скористатися ручним режимом для переміщення або повороту однієї з 3D моделей, що потрапила в конфліктну групу. При цьому слід на кожному кроці змін положення або орієнтації обраної 3D-моделі виконувати перевірку коректності її розміщення.

Візуальний аналіз з виявлення оптимального значення ймовірності схрещування p_c представлено на рис. 5.42. Із запропонованих трьох величин $p_c = 80\%$ забезпечує найменшу висоту побудови групи виробів. Аналіз за значеннями ймовірності мутації p_m представлено на рис. 5.43. Кращими значеннями є $p_m = \{1, 3\}\%$. Але слід враховувати, що зі збільшенням значення p_m зростає ймовірність отримання некоректного розміщення 3D-моделей. Аналіз за кількістю осіб у популяції N_p представлено на рис. 5.44. Збільшення кількості осіб у популяції дозволяє підвищувати ефективність роботи генетичного алгоритму, але також істотно збільшувати часові витрати на розрахунки. Тому при невеликих групах виробів раціональна величина $N_p = \{30, 40, 50\}$. Для групи виробів зі складною геометрією поверхонь більше 5-ти шт слід задавати $N_p = 20$ осіб. Аналіз за останнім параметром - кількість генерацій (поколінь) N_g представлено на рис. 5.45. Природно збільшення кількості генерацій N_g дозволяє одержувати кращі результати за рішенням задачі розміщення 3D-моделей в робочому просторі, але зворотною стороною є істотне збільшення витрат часових ресурсів, практично прямопропорційних заданій величині N_g . З огляду на несуттєву зміну досліджених ознак слід переважно задавати $N_g = 50$ для великих груп виробів (понад 5-ти шт.). І можливо $N_g \geq 200$ є відповідним для малих груп або при відсутності обмежень на часові ресурси щодо виконання технологічної підготовки до матеріалізації виробів адитивними методами.

В результаті отриманими наступними рекомендаціями щодо параметрів генетичного алгоритму для великих груп виробів, особливо зі складною геометрією поверхонь, є:

- ймовірність схрещування, $p_c = 80\%$;

- ймовірність мутації, $p_m = 1 \div 3\%$;
- кількість осіб в популяції, $N_p = 20 \div 50$ (перевага для задавання величини $N_p = 30$);
- кількість генерацій (поколінь), $N_g = 50$.

В подальшому підрозділі розглянуто процедуру, що дозволяє додатково, після використання алгоритму на основі методу Монте-Карло або генетичного алгоритму, виконати автоматичне переміщення 3D-моделей для підвищення ефективності використання робочого простору.

5.10.4 Процедура підвищення ефективності використання робочого простору

Застосовані в розробленій системі алгоритми розміщення не дозволяють повністю задовольнити вимоги щодо забезпечення найбільш раціональних значень цільової функції. Запропонована процедура підвищення ефективності використання робочого простору, тобто поліпшення значень цільової функції, дозволяє за обраним критерієм виконувати несуттєві переміщення 3D-моделей з перевіркою коректності на кожному кроці переміщення. Під несуттєвими переміщеннями мається на увазі завдання кроку, меншого від мінімально допустимої відстані між виробами. При кожному кроці виконується переміщення у напрямку по осі Z для випадково вибраної 3D-моделі до тих пір, поки не буде перевищено задане граничне число спроб переміщення. Напрямок також може вибиратися випадковим чином, чітко за координатними осями X , Y . Що стосується напрямку вздовж осі Z , переміщення виконується тільки в сторону зменшення з метою мінімізації висоти побудови. Величина переміщення 3D-моделей за один крок дорівнює величині розміру вокселя у заданому напрямку. Висунуто припущення, що такий алгоритм може отримувати більш щільне розміщення 3D-моделей, тим самим зменшуєчи висоту побудови і збільшуючи коефіцієнт корисного використання робочого простору установки.

Схему виконання процедури підвищення ефективності використання робочого простору представлено на рис. 5.46. У якості прикладів створено

Тріангуляційна 3D-модель
(список граней
List<base_STL>)

Група воксельних моделей
(Список моделей
List<base_model>)

Розміщення 3D-моделей виробів у робочому просторі з використанням
методу Монте-Карло, генетичного алгоритму або у ручному режимі

Кількість спроб - 1, K

Послідовний вибір моделей

Наступний варіант
розміщення

3D-модель - 1, N

Пошук вільного простору для
розміщення

H_i

Відкладання
3D-моделі

Генерування координат для розміщення 3D-моделей,
при умові $Z_i = Z_{i-1} - h$

ні

да

Перевірка на коректність розміщення

да

Лічильник
невдалих спроб розміщення
- 1, N

ні

Додавання 3D-моделі до списку поточного варіанту заповнення

Визначення раціонального варіанту (порівняння нового та старого
варіанту розміщення) за вибраним критерієм

Аналіз розміщених 3D-моделей за кількістю заповнених і порожніх
підпросторів та кількістю шарів побудови

Рисунок 5.46 – Алгоритм виконання процедури підвищення коефіцієнту
використання робочого простору

кілька варіантів розміщення групи 3D-моделей з використанням генетичного алгоритму. Досліджені ознаки робочого простору з групою 3D-моделей до та після застосування процедури поліпшення розміщення представлено в табл. 5.13 і 5.14. Розрахунки виконувалися при зменшенному коефіцієнти $K_f = 0,6$. Крок переміщення 3D-моделей по координатній осі Z задавався 5 мм.

Таблиця 5.13 - Статистичні характеристики досліджених ознак використання робочого простору до (1-й варіант) та після (2-й варіант) застосування процедури поліпшення (підвищенння ефективності)

Параметри алгоритму				Висота побудови H_B , мм		Коефіцієнт використання робочого простору, K_V		Відносна кількість заповнених підпросторів			
				> 20%		< 1%		1	2	1	2
p_c , %	p_m , %	N_p	N_g	1	2	1	2	1	2	1	2
80	1	20	50	276,77	256,77	0,0426	0,0459	0,045	0,038	0,789	0,774
80	1	30	50	214,79	194,79	0,0549	0,0605	0,031	0,031	0,76	0,732
80	1	40	50	232,37	207,37	0,0507	0,0568	0,027	0,027	0,763	0,741
80	2	20	50	278,36	198,55	0,0423	0,0594	0,046	0,038	0,801	0,758
80	2	30	50	220,03	205,03	0,0536	0,0575	0,039	0,040	0,751	0,749
80	2	40	50	229,97	184,97	0,0513	0,0637	0,045	0,034	0,755	0,718
80	3	20	50	302,85	257,85	0,0389	0,0457	0,046	0,046	0,784	0,784
80	3	30	50	199,37	189,37	0,0591	0,0622	0,031	0,026	0,730	0,730
80	3	40	50	258,14	258,14	0,0456	0,0456	0,047	0,042	0,786	0,786

Таблиця 5.14 - Статистичні показники кількості шарів побудови, до та після застосування процедури поліпшення (підвищенння ефективності)

Параметри алгоритму				Кількість шарів побудови при стратегії пошарової побудови			
				Постійний крок		Змінний крок	
				$\Delta \varphi_{NZ} = 0 \%$		$\Delta \varphi_{NZ} = 5 \%$	
p_c , %	p_m , %	N_p	N_g	1	2	1	2
80	1	20	50	2675	2543	1918	1804
80	1	30	50	2094	1913	1596	1513
80	1	40	50	2260	2049	1574	1531
80	2	20	50	2513	1962	1834	1556
80	2	30	50	2078	2026	1480	1343
80	2	40	50	2273	1825	1744	1486
80	3	20	50	3004	2554	1942	1710
80	3	30	50	1906	1869	1473	1466
80	3	40	50	2529	2557	1773	1818

Аналіз даних, представлених в табл. 5.13 і 5.14, показує недостатню ефективність генетичного алгоритму. Застосування розробленої процедури

дозволяє поліпшити досліджені ознаки:

- висоту побудови H_B на $0 \div 28,7\%$;
- коефіцієнт використання робочого простору K_V на $0 \div 40,4\%$;
- відносну кількість підпросторів заповнених $> 20\% - 24,4\%$ і $< 1\% - 5,4\%$;
- кількість шарів побудови при стратегії пошарової побудови з постійним кроком $- 1,1 \div 21,9\%$, зі змінним кроком – $2,5 \div 15,2\%$.

Використання запропонованого алгоритму упаковки спільно з декомпозицією виробів, виконуваної з урахуванням вільних підпросторів (без матеріалу виробів), дозволить більш істотно поліпшити показники. Практична реалізація такого підходу розглянута в розд. 6.

Запропонований алгоритм процедури досить суттєво дозволяє поліпшити ефективність використання робочого простору АМ-установки. Порівняльний аналіз алгоритмів розміщення надає можливості для подальшого вдосконалення їх стосовно багатокритеріальної задачі розміщення 3D-моделей у робочому просторі.

Можливості інструментів дослідження та виконання оптимізаційних задач технологічної підготовки АМ-процесів розглянуто на прикладі ряду 3D-моделей виробів. Результати досліджень представлено у розд. 6.

Програмний код, що реалізує розроблену систему технологічної підготовки матеріалізації складних виробів адитивними методами розташовано на спеціалізованому сайті github.com за посиланням https://github.com/YaroslavGarashchenko/AT_preparation.git.

Висновки.

1. Розроблено систему технологічної підготовки матеріалізації складних виробів адитивними методами (на рівні готового програмного продукту), що дозволяє досліджувати статистичні характеристики технологічних ознак процесу їх виготовлення без проведення довготривалих та дорогих експериментальних випробувань. Система дозволяє виконувати і досліджувати основні задачі технологічної підготовки, створювати 3D-моделі робочого

простору установки з завантаженими 3D-моделями виробів для їх підготовки до ефективної матеріалізації з можливістю задання орієнтації, положення і структурної оборотної декомпозиції. Включено інструменти для статистичного аналізу властивостей моделей і визначення варіантів вирішення оптимізаційних задач.

2. Розроблено підсистему створення і статистичного аналізу воксельної 3D-моделі виробу в системі технологічної підготовки матеріалізації складних виробів адитивними методами. Підсистема дозволила реалізувати перехід від вихідної тріангуляційної до воксельної моделі. У розроблену підсистему вбудовано інструменти статистичного аналізу для дослідження розподілу елементів воксельної моделі виробу за підпросторами, що належать робочому простору АМ-установки. Пропонуються для кількісної оцінки просторового розподілу вокселей - основні статистичні характеристики. Для візуального аналізу - колірна візуалізація наповненості підпросторів матеріалом (відносної кількості вокселей виробу) та гістограми щільності (або інтегральної функції) ймовірності розподілу дослідженого ознаки.

3. Колірна візуалізація площі граней моделі складного виробу, відображеного на тріангуляційну модель сфери за величиною кута нахилу векторів нормалей у сферичній системі координат, дозволила істотно підвищити рівень наочності при оцінці придатності конструкції для раціональної орієнтації виробу в робочій області побудови.

4. Статистичний аналіз розподілу фрактальної розмірності контурів областей пошарового формоутворення дозволив науково-обґрунтовано визначати геометричну складність контурів областей пошарового формоутворення виробу. Використання відносних мір, що задаються відповідно довжині контуру, дозволяє отримувати фрактальну розмірність незалежно від масштабу контуру. При такому підході одержувані розмірності є застосовними для виконання порівняльного аналізу складності контурів. Мінімізація відхилення фрактальної розмірності від евклідової дозволяє визначити область скейлінга, яка повинна відповідати раціональним значенням

геометричних обмежень обраної технології та АМ-обладнання для матеріалізації заданої 3D-моделі.

5. Рішення оптимізаційної задачі технологічної підготовки за визначенням раціональної орієнтації виробу в області пошарової побудови на основі цільової функції мінімізації площі поверхні з найбільшою величиною похибки формоутворення показує досить високу ефективність стосовно до виробів зі складною геометрією.

6. Визначення області значень кутів повороту тріангуляційної 3D-моделі для завдання раціональної орієнтації виробу дозволяє розширити можливості технологічної підготовки адитивних технологій шляхом збільшення варіантів раціональної орієнтації, що необхідно при вирішенні наступних задач з раціонального розташування в робочому просторі АМ-установки.

7. Розроблена система розміщення 3D-моделей виробів у робочому просторі вирішує задачу в ручному режимі, за методом Монте-Карло, генетичного алгоритму та процедури для підвищення ефективності розміщення. Можливість суміщення режимів роботи дозволяє істотно підвищити ефективність вирішення задачі розміщення 3D-моделей у робочому просторі АМ-установки.

8. Результати досліджень показали, що розміри вокселей 3D-моделей повинні визначатися найменшими розмірами конструктивних елементів виробу. Тому попередньо необхідно виконувати оцінку мінімальної товщини матеріалу для кожного виробу. Розмір вокселя не повинен перевищувати виявлену мінімальну величину товщини матеріалу (стінок виробу).

9. На підставі отриманих результатів модельних досліджень виявлено раціональні параметри запропонованого алгоритму розміщення 3D-моделей виробів у робочому просторі за методом Монте-Карло. Попереднє сортування необхідно виконувати за зменшенням об'єму (для 3D-моделей з простими за геометрією поверхонь) або габаритних розмірів (для складних 3D-моделей). У разі необхідності матеріалізації виробів, що суттєво відрізняються за своїми габаритами або об'ємами, становить інтерес їх сортування з подальшим

створенням двох груп, однакових за кількістю. Потім за почерговим взяттям з кожної групи виконується розміщення виробів. Крок завдання координат по осі Z слід задавати в залежності від вимог на терміни виконання технологічної підготовки матеріалізації виробів. Переважно крок переміщення 3D-моделі задавався рівним (не більшим) гранично допустимій величині мінімальної відстані між розміщеними 3D-моделями. У разі виробів з простими за геометрією поверхонь і розподілу матеріалу у просторі, рекомендується задавати $3 \div 5$ варіантів розміщення. Стосовно до складних - $5 \div 10$. На кожному етапі розміщення поточної 3D-моделі виробу виконувалось $4 \div 7$ спроб визначення вільного простору. Для складних виробів - $8 \div 20$. Збільшення кількості спроб пошуку вільного простору дозволяє поліпшити значення обраної цільової функції оптимізації. Так як множина вокселей виробів є за своєю суттю надмірною для задачі перевірки коректності перевірки, то в алгоритмі передбачено параметр вибору кожного n -го вокселя. Тому для простих 3D-моделей, в залежності від співвідношення розміру вокселя до величини мінімальної відстані між розміщеними 3D-моделями, слід при перевірці конфліктних вокселей вибирати кожний $10 \div 40$. Менша величина обирається при досить великих розмірах вокселя щодо величини мінімальної відстані між розміщеними 3D-моделями. Для складних моделей - $1 \div 9$. Менша величина обирається у разі підвищених вимог до точності перевірки коректності розміщення. Наприклад, в разі розгляду невеликої кількості варіантів розміщення.

10. Виходячи з аналізу модельних даних при використанні генетичного алгоритму для задачі розміщення 3D-моделей виявлено раціональні параметри запропонованого алгоритму розміщення. Мала величина ймовірності мутації призводить до більшої кількості невдалих варіантів розміщення, тобто ті, що не забезпечують коректного розміщення 3D-моделей. Особливо це є серйозною проблемою при малій популяції і великій кількості генерацій. Раціональною є величина кількості генерацій - 50. Збільшення числа осіб в популяції збільшує істотно час розрахунків, при цьому очікуваного поліпшення показників не

демонструється. Кількість поколінь (генерацій) дозволяє несуттєво впливати на ефективність роботи генетичного алгоритму. Виявлено оптимальні значення коефіцієнта посилення цільової функції. Більший за величиною значення коефіцієнт посилення цільової функції дозволяє отримувати кращі показники досліджених ознак, але при цьому істотно зростає ймовірність отримання некоректного розміщення 3D-моделей. На розглянутому прикладі виробів одержано наступні рекомендації щодо параметрів генетичного алгоритму: ймовірність схрещування - 80%; ймовірність мутації - 1÷3%; кількість осіб в популяції - 20÷50; кількість генерацій (поколінь) - $N_g = 50$.

11. Модельні дослідження на основі групи 3D-моделей виробів з різною геометричною складністю поверхонь дозволили виявити рекомендації щодо завдання раціональних параметрів та режимів роботи для ефективного вирішення задачі розміщення виробів у робочому просторі АМ-установки. Розроблено процедуру підвищення ефективності використання робочого простору АМ-установки. Данна процедура дозволяє поліпшити такі досліджені ознаки (після застосування генетичного алгоритму): зменшити висоту побудови до 29%; збільшити відносну кількість заповнених підпросторів (більше 20% матеріалу) до 24%; зменшити кількість шарів побудови зі змінним кроком до 15%.

РОЗДІЛ 6

ТЕХНОЛОГІЧНА ПІДГОТОВКА АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА СКЛАДНИХ ВИРОБІВ

У цьому розділі представлено результати експериментальних досліджень і практичного вирішення комплексу задач в системі технологічної підготовки до матеріалізації складних виробів адитивними методами. Вироблено практичні рекомендації щодо реалізації розроблених підходів до вирішення оптимізаційних задач: структурної оборотної декомпозиції, раціональної орієнтації і розміщення в робочому просторі АМ-установки з вибором стратегії пошарового розсічення.

6.1 Корекція кроку при пошаровій побудові зі змінною товщиною

Недоліком існуючих способів пошарового виготовлення є виникнення похибок формоутворення поверхонь виробів. Під похибкою формоутворення розуміється надлишкова або недостатня частина матеріалу на поверхнях виробів, що виникають внаслідок технологічних особливостей процесу пошарового виготовлення.

Наприклад, при здійсненні стратегії пошарової побудови 3D-моделі, представленої у роботі [124], виріб повинен мати аналітичний опис поверхні в доступній формі для аналізу. Крок переміщення столу (крок побудови) підбирається з урахуванням граничного значення кута нахилу поверхні до напрямку переміщення столу і допустимої точності формоутворення. Розрахунок виконується на основі аналітичного опису поверхні моделі виробу, що вимагає досить багато часу на технологічну підготовку і знижує продуктивність процесу виготовлення в цілому. Стратегія, описана у роботі [125], не має наведених недоліків як у попередньої [124] завдяки визначеню кроку побудови для кожного шару за мінімальним значенням з усіх розрахованих величин кутів між нормальними векторами плоских трикутних граней вихідної тріангуляційної моделі виробу, що належать даному шару, і

вектором напрямку побудови виробу при забезпеченні допустимої похибки формоутворення. Але обидва способи мають загальний недолік - не враховуються плоскі поверхні, які як правило, розташовують перпендикулярно вектору побудови (паралельно площині шарів) [1]. Через такий недолік з'являється додаткова похибка формування плоских поверхонь через розбіжності координат шарів побудови з координатами плоских поверхонь по осі Z (в напрямку побудови). На рис. 6.1 представлена профіль виробу з розбивкою на верстви, що показує схему утворення похибки розміру для плоских поверхонь, що перпендикулярні осі Z . Максимальна похибка розміру може скласти величину кроку побудови. З огляду на особливість адитивних методів пошарової побудови виробів, як правило, матеріалізація здійснюється з великими значеннями кроку побудови для забезпечення більшої продуктивності і меншої собівартості виготовлення. Відповідно і похибки розмірів для плоских поверхонь мають досить велике значення — $0,1 \div 0,2$ мм.

Запропоновано при здійсненні пошарової побудови виробів зі змінною товщиною шарів виконувати орієнтацію 3D-моделі плоскими поверхнями перпендикулярно напрямку побудови. При цьому величину кроку побудови для шарів найближчих до даних плоских поверхонь виробу коригувати за наступним рівнянням:

$$h_i = h_i + (Z_{plane} - Z_i),$$

де h_i — крок побудови i -го шару матеріалу; Z_{plane} , Z_i — координати по осі Z (напрямку побудови) плоскої поверхні і шару матеріалу відповідно; при виконанні умови для попереднього і подальших шарів матеріалу:

$$h_{min} \leq h_i \leq h_{max},$$

де h_{min} , h_{max} — мінімально і максимально допустимі величини кроку побудови, що визначаються технологічними можливостями АМ-обладнання і властивостями вихідного матеріалу для виробу; якщо не виконується умова, то коригують крок побудови починаючи з попереднього шару h_{i-1} .

На рис. 6.1-6.3 зображені варіанти завдання набору січних площин Z_i для пошарової побудови виробу, представленого у вигляді перетину профілю в

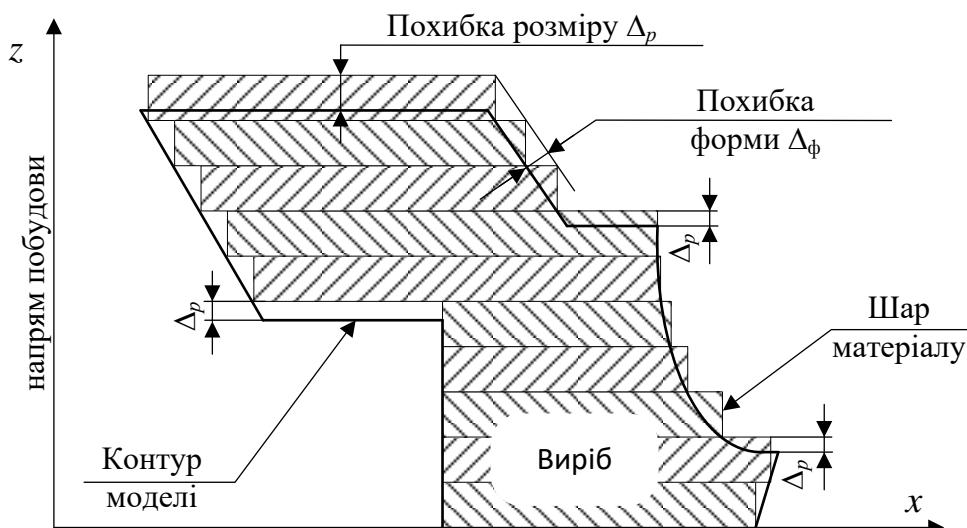


Рисунок 6.1 – Приклад побудови виробу з великим кроком

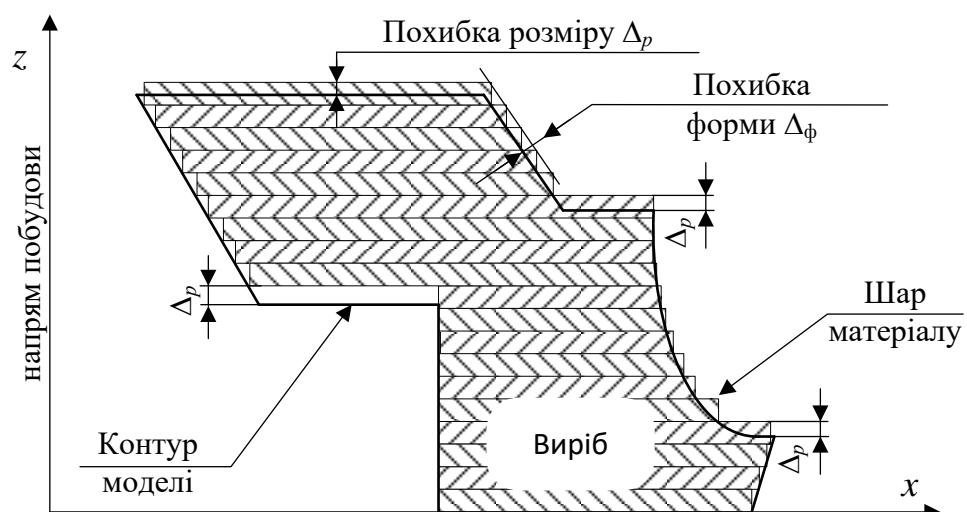


Рисунок 6.2 – Приклад побудови виробу з малим кроком

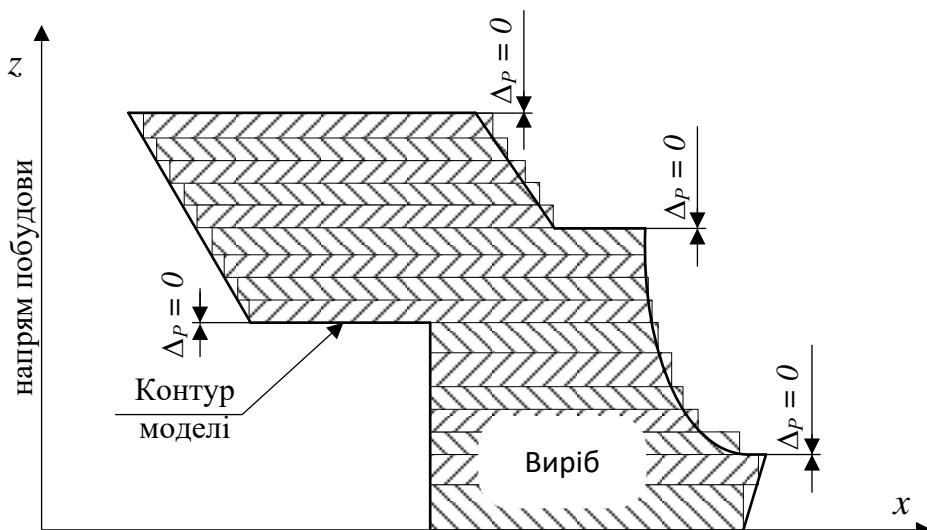


Рисунок 6.3 – Запропонований спосіб корекції за стратегією з перемінним кроком побудови

площині XZ . Координати січних площин визначаються кроком побудови для кожного окремого опускання столу. На рис. 6.1 представлено приклад створення набору січних площин при постійному найбільшому кроці побудови, що забезпечує більшу продуктивність. На рис. 6.2 — при найменшому кроці побудови, що забезпечує мінімальну похибку формоутворення. У запропонованому способі крок побудови задається таким чином, щоб шари формувалися з урахуванням розташування плоских поверхонь, розташованих перпендикулярно напрямку побудови, як показано на рис. 6.3. На рис. 6.4 представлено схему одержання виробу при пошаровій побудові, що включає етапи та послідовність дій. До відомих дій додано коригування кроку побудови для забезпечення збігу координат розташування січних площин шарів матеріалу з плоскими поверхнями виробу.

У сучасних АМ- установках крок побудови є величиною постійною або змінною, що задається вручну або програмою, виходячи з їхніх технологічних особливостей. Тому запропоноване корегування кроку може бути реалізовано на більшій частині АМ- установок.

Необхідна умова для застосування пропонованого рішення – це наявність плоских поверхонь для моделі виробу (плоскі поверхні, як правило, присутні для промислових виробів). Достатня умова забезпечується на етапі задання орієнтації виробу на робочій платформі установки шляхом орієнтації векторів нормалей плоских поверхонь з найбільшою площею уздовж осі Z . Завдання орієнтації виробу виконують вручну або програмно. Програмна реалізація можлива на основі статистичного аналізу нормалей граней тріангуляційної моделі виробу. Запропоновану схему дій та взаємодії з даними системи технологічної підготовки (див. розд. 5) представлено на рис. 6.5. Схема дозволяє визначити кути повороту моделі навколо координатних осей для розташування (орієнтації) плоских поверхонь виробу з найбільшою площею перпендикулярно напрямку побудови. Переваги схеми у простоті реалізації та мінімальному часі обчислення кутів повороту виробу.

CAD-модель виробу



Тріангуляційна модель виробу (STL-файл)



Пошарова побудова

Виконання декомпозиції виробу (поділ на частини) при перевищенні габаритів робочої платформи установки

Орієнтація і розміщення виробу на робочій платформі

- орієнтація плоских поверхонь виробу (з найбільшою сумарною площею) перпендикулярно вектору напрямку побудови
- розміщення (забезпечення щільного розташування) виробів

Визначення координат набору плоских поверхонь перпендикулярних осі Z

Задання технологічних параметрів (крок побудови, стратегія руху, швидкість переміщення, потужність лазерного променю, тепловий режим та інше)

Задання кроку побудови для набору шарів за критерієм точності або продуктивності виготовлення

Коригування кроку побудови з урахуванням розташування плоских поверхонь

Визначення координат по осі Z набору шарів



Зміна кроку побудови найближчих шарів до плоских поверхонь для забезпечення мінімального відхилення їх координат (обмеження: мінімальне, максимальне допустимі значення і дискретність кроку)



Готовий виріб

Рисунок 6.4 – Схема корекції за стратегією з перемінним кроком побудови

Для схеми на рис. 6.5 вихідною інформацією є STL-файл виробу. STL-файл містить інформацію щодо системи трикутних граней – координати одиничного вектору їх нормалі та трьох вершин. Групування трикутних граней з підсумовуванням їх площ здійснюється на основі спільної ознаки - координати векторів нормалей. Для включення плоских поверхонь, що мають протилежний напрям векторів нормалей, трикутна грань додається до відповідної групи при виконанні наступної умови:

$$\left(\begin{array}{l} N_{x(j)} = N_{x(k \text{ } ep)} \wedge N_{y(j)} = N_{y(k \text{ } ep)} \wedge N_{z(j)} = N_{z(k \text{ } ep)} \end{array} \right) \vee \\ \left(\begin{array}{l} N_{x(j)} = -N_{x(k \text{ } ep)} \wedge N_{y(j)} = -N_{y(k \text{ } ep)} \wedge N_{z(j)} = -N_{z(k \text{ } ep)} \end{array} \right),$$

де $N_{x(k \text{ } ep)}$, $N_{y(k \text{ } ep)}$, $N_{z(k \text{ } ep)}$ — коефіцієнти (направляючі косинуси) одиничного вектора направляючих трикутних граней k -ї групи (загальна кількість груп визначається кількістю граней, що мають унікальний напрям);

$N_{x(j)}$, $N_{y(j)}$, $N_{z(j)}$ — коефіцієнти (напрямні косинуси) одиничного напрямного вектора j -ї трикутної грані.

Визначення кутів повороту виробу навколо координатних осей для орієнтації по осі Z векторів нормалей обраної групи граней (з найбільшою площею) виконується на основі відомої функції для розрахунку кута між векторами [206]. Повторно розраховані координати по осі Z для набору плоских поверхонь $Z_{plane(p)}$ записуються в 3-ю базу даних (рис. 6.5) і використовуються в наступному коригуванні кроків побудови.

Пропоноване рішення коригування кроків побудови виробу реалізується на етапі завдання технологічних параметрів (рис. 6.4) за такою послідовністю дій:

- завдання кроку побудови h_i (постійного або змінного) для набору січних площин шарів матеріалу за критерієм забезпечення точності (приклади реалізації [73, 124]), фізико-механічних властивостей або продуктивності виготовлення (вибираються максимально допустимі значення, обмежені технологічними можливостями установки);

- визначення координат по осі Z набору січних площин:

Тріангуляційна модель виробу (STL-файл)



Розрахунок координат векторів нормалей трикутних граней і їх площі



База даних

Координати векторів нормалей і вершин, площі трикутних граней



Групування за спільною ознакою (координатами векторів нормалей) з підсумовуванням площ



База даних

Координати векторів нормалей і площа груп трикутних граней



Вибір групи з найбільшою площею трикутних граней.

Визначення кутів повороту виробу навколо координатних осей для орієнтації векторів нормалей обраної групи граней за віссю Z



Поворот виробу навколо координатних осей.

Визначення координат по осі Z для всіх груп трикутних граней, що мають площину більше мінімально допустимої $Smin$



База даних

Координати плоских поверхонь, перпендикулярних осі Z



Збереження тріангуляційної моделі виробу (STL-файл)

Рисунок 6.5 – Взаємодія з даними системи при корекції за стратегією з перемінним кроком побудови

$$Z_i = \sum_{i=1}^i h_i, \quad i \in [1, m],$$

де h_i — крок побудови для i -ї січної площини шару матеріалу,

m — загальна кількість січних площин (шарів матеріалу);

- збереження результатів розрахунку в базу даних (n, Z_n, h_n);

- коригування кроку побудови h_i (з урахуванням дискретності завдання Δ_z) для найближчих січних площин до плоских поверхонь, перпендикулярних напрямку побудови (схема представлена на рис. 6.6)

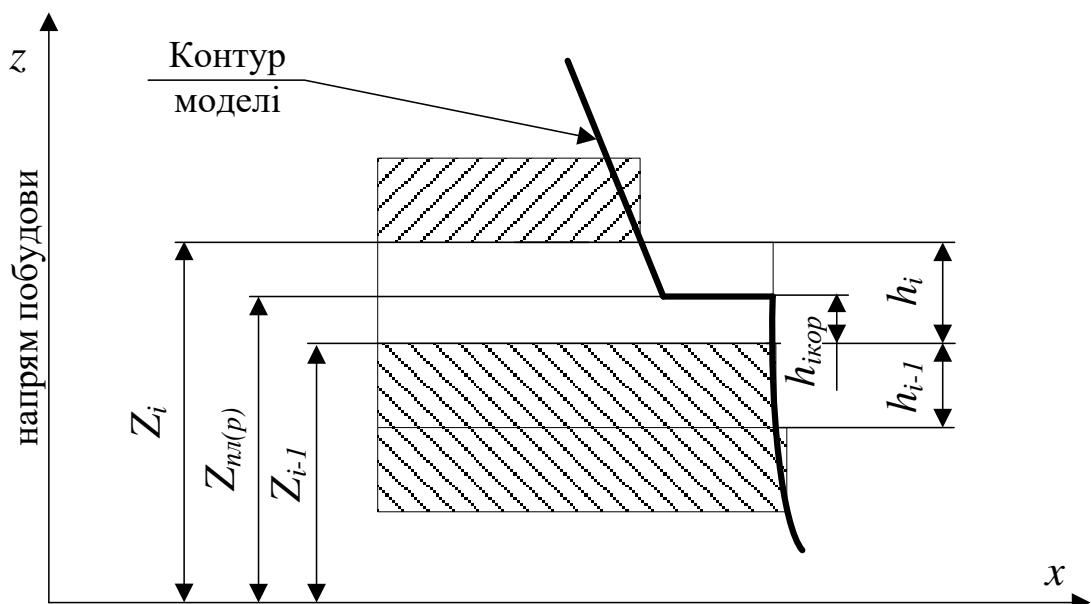


Рисунок. 6.6 – Розрахункова схема корекції перемінного кроku побудови

— вибір i -ї січної площини для корекції кроku за умовою

$$Z_{i-1} < Z_{plane(p)} < Z_i \quad \wedge \quad Z_{plane(p)} - Z_{plane(p-1)} > h_{min},$$

— коригування кроku побудови для i -ї січної площини

$$h_i = \begin{cases} h_i, & \text{якщо } Z_{plane} - Z_i < \Delta_z; \\ h_i + (Z_{plane} - Z_i), & \text{якщо } h_i + (Z_{plane} - Z_i) > h_{min}; \end{cases}$$

— коригування кроku побудови для $(i-1)$ січної площини за умови

$$h_i + (Z_{plane} - Z_i) < h_{min},$$

$$h_{i-1} = \begin{cases} h_{i-1} + h_i + (Z_{plane} - Z_i), & \text{якщо } h_{i-1} + h_i + (Z_{plane} - Z_i) < h_{max}; \\ h_{min}, & \text{якщо } h_{i-1} + h_i + (Z_{plane} - Z_i) > h_{max}; \end{cases}$$

де h_{min}, h_{max} — мінімально і максимально допустимі величини кроку побудови.

- дії визначення координат та збереження розрахунків для наступних шарів з урахуванням корекції кроку i -ї січної площини;
- запис технологічних параметрів у файл конфігурації процесу пошарової побудови виробу або ручне введення на установці.

Використання запропонованої стратегії побудови з корекцією кроку дозволяє істотно розширити можливості регулювання точності пошарового виготовлення виробів. Перевагою запропонованої стратегії побудови є також простота реалізації корекції кроку побудови з урахуванням розташування плоских поверхонь виробу, які є, як правило, відповідальними (з підвищеними вимогами щодо точності виготовлення) у промисловому виробі.

6.2 Визначення раціональної орієнтації виробів у робочому просторі адитивної установки

У цьому розділі представлено результати дослідження, що направлені на визначення раціональної орієнтації виробів в робочому просторі. У якості 3D-моделей використовувалися промислові вироби, які за розробленими підходами щодо оцінки геометричної складності (розд. 3) розділено на ті, що мають прості та на ті, що мають складні за геометрією поверхні.

Дослідження можливостей щодо визначення раціональної орієнтації тріангуляційної 3D-моделі в робочій області пошарової побудови виконувалося в підсистемі, яка створювалася для вирішення завдання статистичного аналізу досліджених ознак для набору варіантів орієнтації 3D-моделі виробу. Розроблену підсистему статистичного аналізу варіантів орієнтації виробу представлено у розд. 5.7. Система дозволяє визначати раціональні варіанти орієнтації виробу на основі результатів статистичного аналізу розподілу величин досліджуваної ознаки. Основною досліджуваною ознакою є висота побудови виробів, що визначає час побудови. Найбільш важливою ознакою, що визначає якість отриманих поверхонь при виготовленні групи виробів за одне завантаження АМ-установки, є множина кутів між вектором напрямку

побудови та нормалями граней ϕ_{NZ} за відносній їх площині S_{Rel} .

Дослідження можливостей визначення раціональної орієнтації 3D-моделі виконано шляхом порівняльного аналізу за висотою побудови, кількістю шарів N_L та відносною площею поверхонь з найбільшими значеннями відхилення від правильної форми 3D-моделей. Алгоритм визначення раціональної орієнтації виробу у робочому просторі АМ-установки представлено на рис. 6.7.

З міркувань зменшення часу дослідження для визначення оптимальної орієнтації, використовувалася дискретність повороту моделі – 10° . У результаті одержуємо 324 варіанти орієнтації виробу. У дослідженні визначалась частка із загальної кількості варіантів, що може бути віднесена до раціональних у залежності від обраного критерію оптимізації. У якості критерію оптимізації обрано: мінімальну висоту побудови H_B та відносну площину поверхні S_{Nz} , що має нормальні з кутом ϕ_{NZ} у заданому інтервалі. Розглядалося три варіанти інтервалів значень кутів $\phi_{NZ} \in (0^\circ, 45^\circ]$ або $\phi_{NZ} \in [135^\circ, 180^\circ)$ (задавався допустимий ліміт на поверхню з найбільшою похибкою від правильної форми – менше 15%) для мінімізації площині S_{Nz} та $\phi_{NZ} \in (60^\circ, 120^\circ)$ для максимізації площині S_{Nz} - (більше 50%). Результати дослідження для простих геометричних тіл представлено у табл. 6.1.

Таблиця 6.1 - Порівняльний аналіз за відносною кількістю раціональних варіантів орієнтації для простих геометричних тіл

№	Модель (габаритні розміри, мм)	Критерій оптимізації			
		Висота побудови, $H_{поб}$	Відносна площа поверхні S_{Nz} з кутами нахилу нормалей ϕ_{NZ}		
			$(0^\circ, 45^\circ]$	$(60^\circ, 120^\circ)$	$[135^\circ, 180^\circ)$
1	Куб ($L = 100$)	6,2%	6,2%	6,2%	6,2%
2	Конус ($D = 100, H = 100$)	58,6%	42,6%	66,0%	48,1%
3	Top ($D = 100, d = 10$)	11,1%	74,1%	69,1%	74,1%
4	Циліндр ($D=100, H=100$)	40,1%	30,9%	75,3%	33,3%
5	Пружина (100x100x10)	8,6 %	74,1%	69,1%	74,1%

CAD-модель виробу



Тріангуляційна модель виробу (STL-файл)



Пошарова побудова

При перевищенні габаритів виробу та розмірів робочої платформи установки виконується декомпозиція виробу (поділ на частини)

Орієнтація і розміщення виробу на робочій платформі

Кути повороту
виробу навколо осей X , Y
 $\varphi_x \in [0^\circ, 180^\circ], \varphi_y \in [0^\circ, 180^\circ]$

Визначення координат вершин, векторів нормалей
граней і їх площин

База даних
Координати вершин, векторів нормалей і площин
трикутних граней

Визначення та статистичний аналіз кутів між векторами нормалей
граней і напрямку побудови

База даних

• Відносна площа поверхонь, що мають кут ϕ_{NZ} у заданому інтервалі

Визначення величин кутів повороту виробу

Технологічні параметри побудови (крок побудови, стратегія руху і
швидкість переміщення лазерного променя, потужність
випромінювання, тепловий режим та інше)



Готовий виріб

Рисунок 6.7 – Алгоритм визначення раціональної орієнтації виробу

Одержані дані (представлено у табл. 6.1) створюють методологічну основу для дослідження промислових виробів і виконання порівняльного аналізу ефективності обраної орієнтації виробу. За одержаними результатами найбільш простою, щодо визначення раціональної орієнтації, є 3D-модель кубу. Найбільш складною є 3D-модель тору та пружини. Відповідно моделі тора та пружини дозволяють більш гнучко виконувати задачу визначення їх орієнтації для більш ефективного використання робочого простору АМ-установки.

Результати модельних розрахунків на прикладі 3D-моделей базових геометричних тіл дозволили виявити достатньо суттєвий вплив вибору критерію оптимізації. Навіть використання 3D-моделей базових геометричних тіл підтвердило ефективність запропонованого критерію оптимізації щодо мінімізації площин поверхонь S_{NZ} з кутами нахилу нормалей $\varphi_{NZ} \in (0^\circ, 45^\circ] \cup \varphi_{NZ} \in [135^\circ, 180^\circ)$.

6.2.1 Промислові вироби з простою геометрією поверхонь

У якості тестових вибрано три 3D-моделі промислових виробів, що представлено на рис. 6.8.

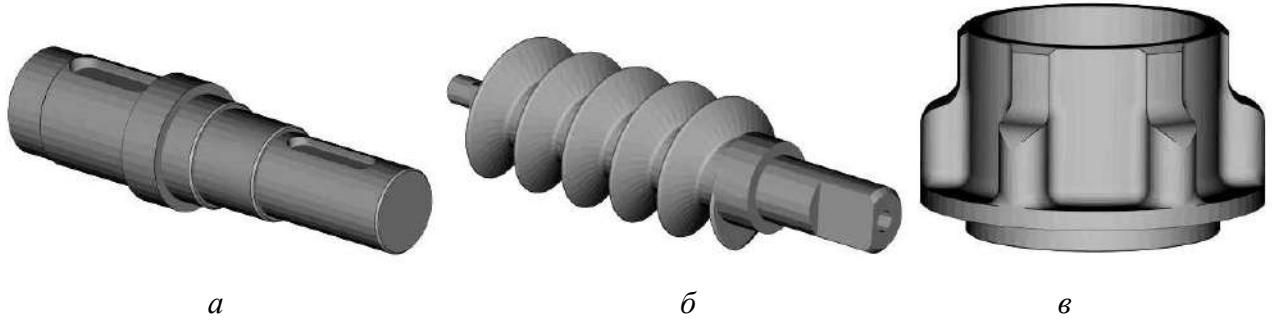


Рисунок 6.8 - Тестові 3D-моделі виробів з простою геометрією поверхонь

Дані розрахунків за кількістю оптимальних варіантів раціональної орієнтації одиничних виробів наведено в табл. 6.2.

Аналіз одержаних даних показує, що конструкції шнеку та валу є найбільш придатними для ефективного сумісного виконання задач орієнтації та розташування у робочому просторі установки.

Таблиця 6.2 - Порівняльний аналіз за кількістю раціональних варіантів орієнтації для тестових моделей промислових виробів

№	Модель (габаритні розміри, мм)	Критерії оптимізації			
		Висота побудови, $H_{\text{поб}}$	Відносна площа поверхні S_{NZ} за наступними інтервалами кутів φ_{NZ}		
			$(0^\circ, 45^\circ]$	$(60^\circ, 120^\circ)$	$[135^\circ, 180^\circ)$
1	Вал ($64 \times 64 \times 138$)	22,2%	66,6%	44,4%	66,6%
2	Шнек ($40 \times 40 \times 144$)	69,1%	72,8%	65,4%	25,9%
3	Корпус ($210 \times 210 \times 125$)	7,4%	35,8%	19,8%	34,6%

Щільність розподілу кутів φ_{NZ} для одного з оптимальних варіантів орієнтації валу та шнеку представлено на рис. 6.9 і 6.10 відповідно.

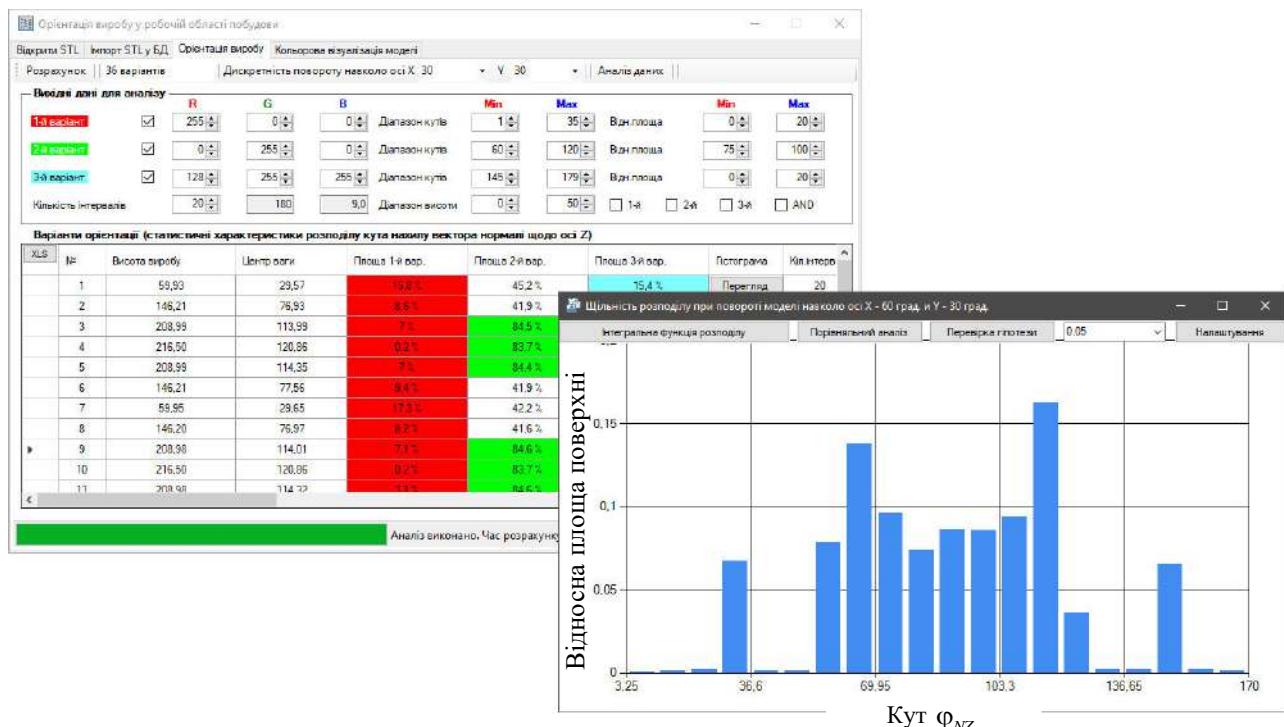


Рисунок 6.9 – Статистичний аналіз кутів φ_{NZ} для одного з оптимальних варіантів орієнтації валу

Щільність розподілу кутів φ_{NZ} для одного з оптимальних варіантів орієнтації корпусу представлено на рис. 6.11.

На рис. 6.12 представлено один з оптимальних варіантів розміщення тестових 3D-моделей на платформі SLS- установки 3D Systems Vanguard. Вибране розміщення забезпечує найбільше заповнення робочого простору установки, що необхідно для найкращого використання вихідного матеріалу для одержування виробів, а також мінімального об'єму конструкцій підтримки.

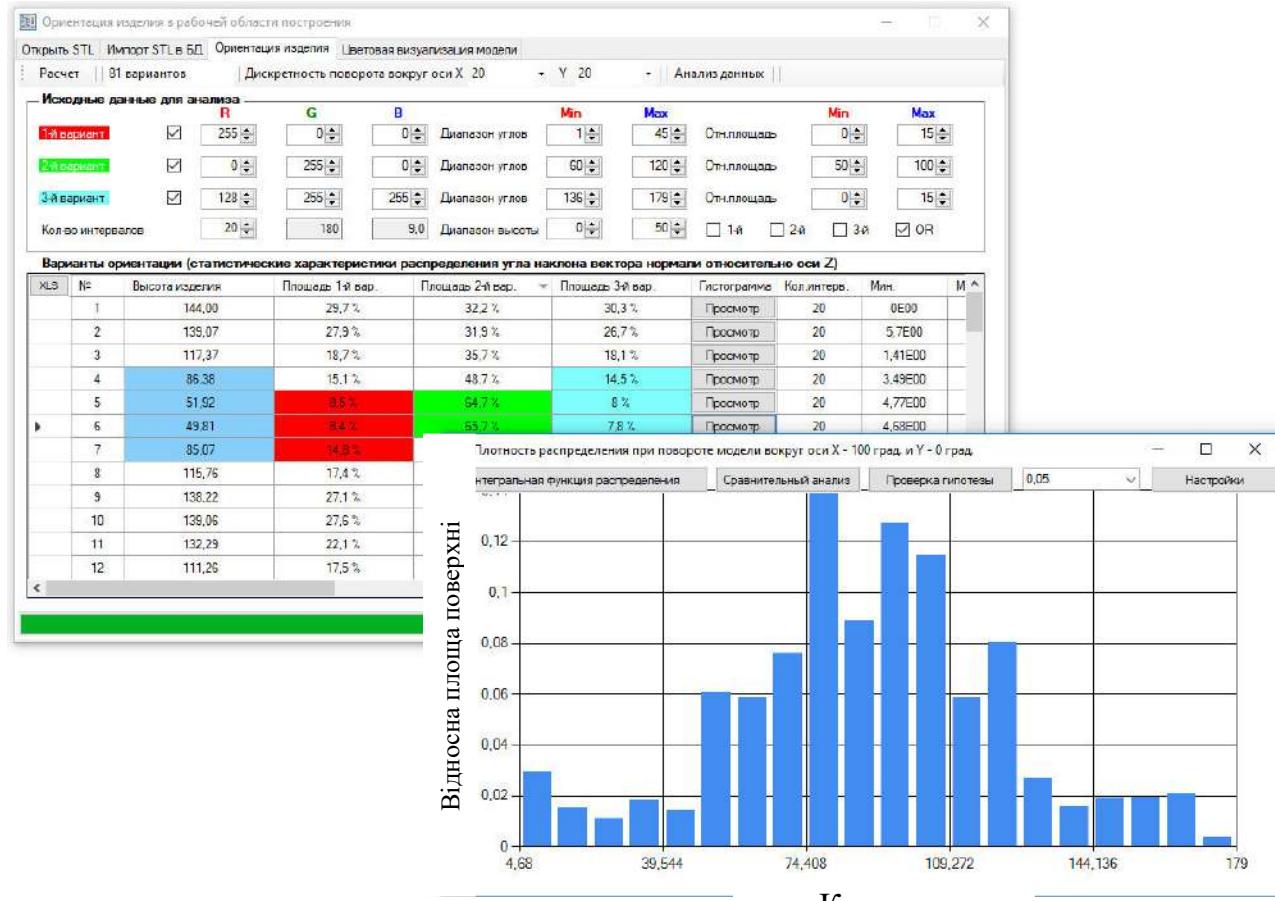


Рисунок 6.10 – Статистичний аналіз кутів φ_{NZ} для одного з оптимальних варіантів орієнтації шнеку

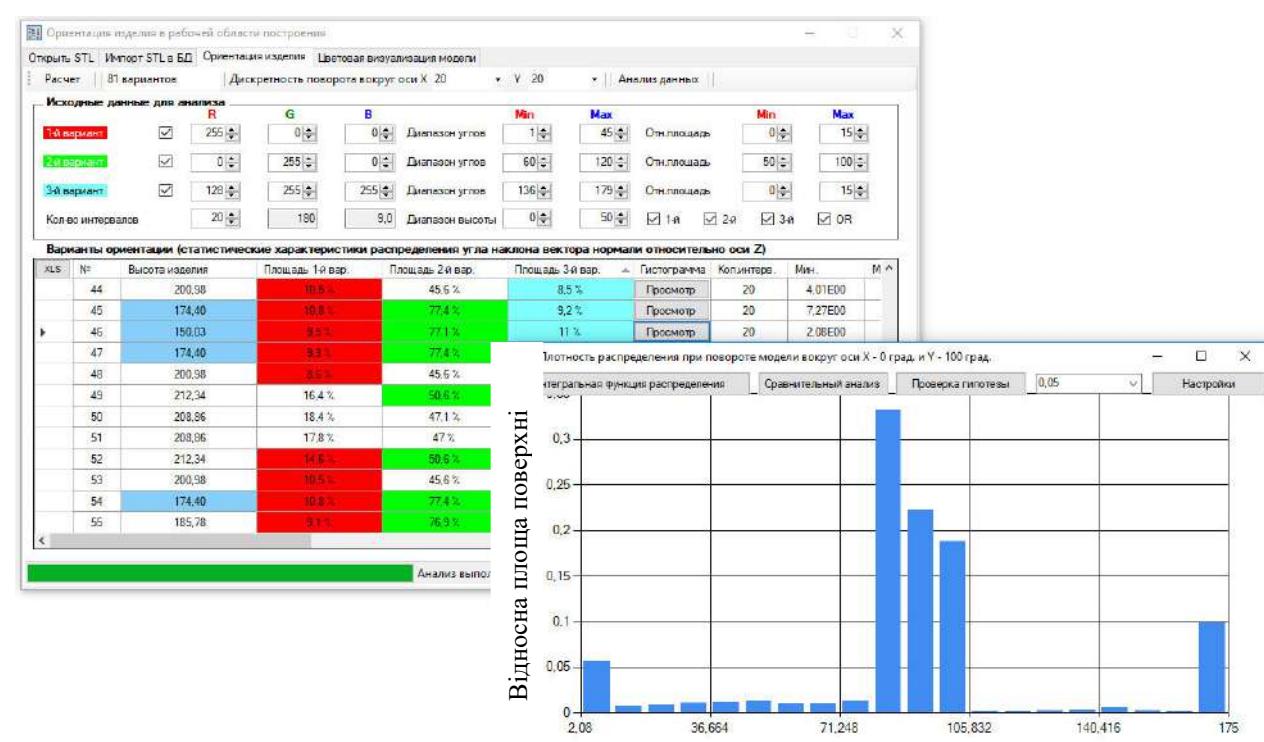


Рисунок 6.11 – Статистичний аналіз кутів φ_{NZ} для одного з оптимальних варіантів орієнтації корпусу

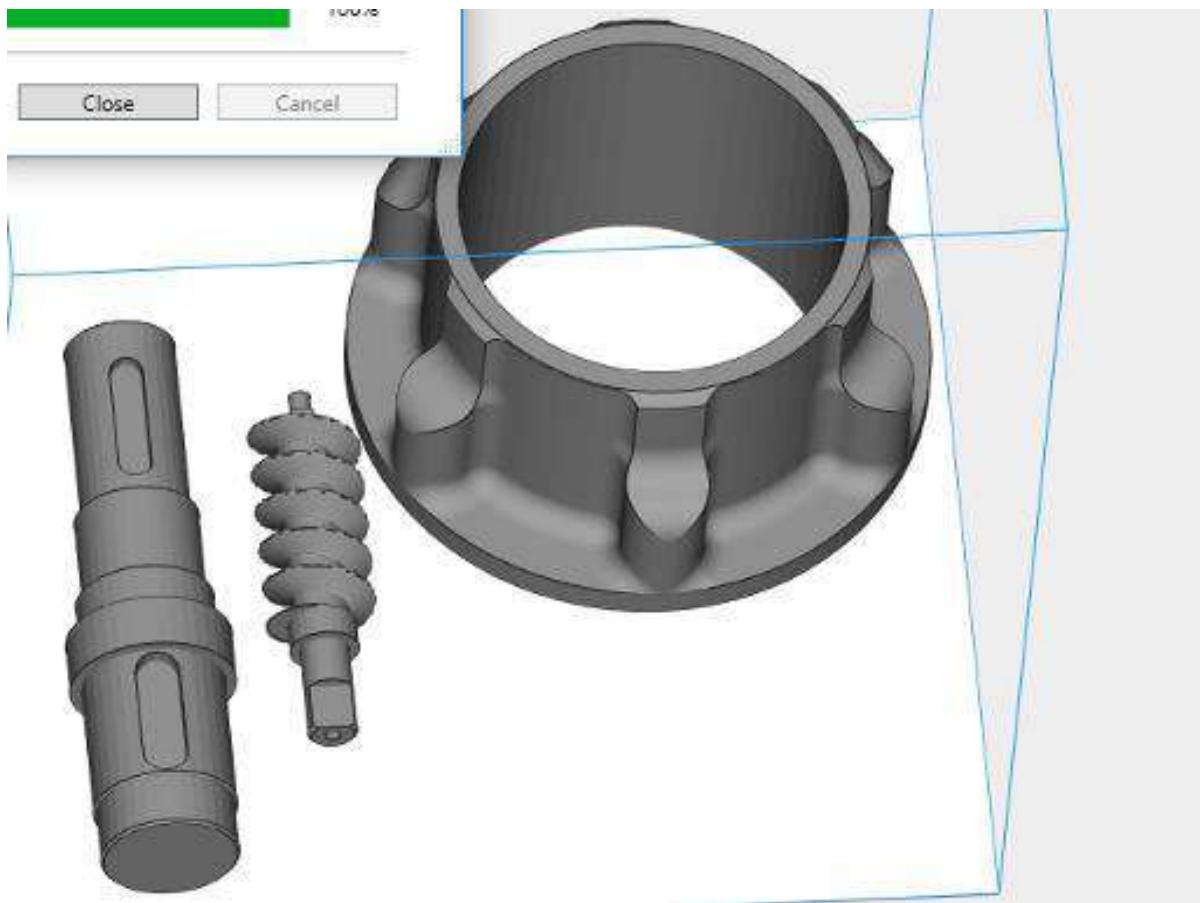


Рисунок 6.12 – Розміщення тестових моделей у робочому просторі установки SLS Vanguard Si2

Результати розрахунків кількості шарів побудови, у залежності від параметрів пошарового розсічення, зведені в табл. 6.3. Кількість варіантів орієнтації зменшено за рахунок прибирання свідомо невдалих як надлишкових для даного дослідження.

Розширення варіантів розміщення виробів у робочому просторі виконано за рахунок зміни орієнтації виробів. У якості досліджуваних параметрів адаптивної стратегії пошарового розділення обрано рівень усічення розподілу $\Delta\varphi_{NZ} = 5\%$. Також розглянуто вплив заданої граничної величини відхилення від правильної форми поверхонь $\Delta s_{max} = \{0,1; 0,2\}$ мм.

У табл. 6.3 результати розсічення наведено при змінному кроці (перший варіант розрахунку), що виконувався за адаптивною стратегією при завданні $\Delta s_{max} = 0,1$ мм та з усіченням розподілу кутів між вектором побудови та нормальними граней поверхонь виробу $\Delta\varphi_{NZ} = \{0, 5\} \%$.

Виходячи з одержаних даних (табл. 6.3) усі параметри адаптивного розділення 3D-моделей виробів дозволяють суттєво вплинути на кількість кроків побудови. Найбільший вплив має допустима похибка формоутворення, що дозволяє при збільшенні її величини удвічі зменшити кількість кроків на 23÷50% у залежності від обраної орієнтації. Усічення площин для гістограм розподілу кута φ_{NZ} на 5% дозволяє зменшити кількість кроків на 1,2÷25,2%. Ефективність від використання стратегії пошарового розділення з усіченням збільшується для варіантів з кращою (більш раціональною) орієнтацією виробів. Найраціональнішим виявився 1-й варіант.

Таблиця 6.3 - Порівняльний аналіз стратегій пошарової побудови тестових моделей за кількістю кроків

№	Кут повороту 3D-моделі навколо власної осі X			Стратегії пошарової побудови		
			Змінний крок (без усічення)	Змінний крок (з усіченням розподілу $\Delta\varphi_{NZ}$ - 5 %)		
	Вал	Шнек		$\Delta S_{max} = 0,1$ мм	$\Delta S_{max} = 0,2$ мм	
1	0°	0°	0°	856	788	480
2	0°	0°	90°	1630	1596	873
3	0°	90°	0°	1153	1060	587
4	0°	90°	90°	1951	1929	954
5	90°	0°	0°	1114	972	749
6	90°	0°	90°	1654	1600	882
7	90°	90°	0°	1320	988	751
8	90°	90°	90°	1976	1945	970

Результати статистичного аналізу досліджених ознак (кроку побудови, середньоарифметичної величин відхилення від правильної форми) представлені в табл. 6.4, 6.5. Візуальний аналіз розподілу кроку побудови у вигляді гістограми представлено на рис. 6.13.

Результати модельних розрахунків на прикладі 3D-моделей промислових виробів дозволило виявити відмінності у стратегіях зі змінним кроком побудови в залежності від обраної орієнтації виробу та його складності за геометрією. Отримані дані (табл. 6.1-6.5) дозволяють зробити висновок щодо достатньої ефективності стратегії зі змінним кроком та обраних орієнтацій.

Таблиця 6.4 - Порівняльний аналіз стратегій пошарової побудови тестових моделей за статистичними характеристиками розподілу кроків

№	Квартилі	Стратегії пошарової побудови		
		Змінний крок (без усічення)	Змінний крок (з усічення розподілу $\Delta\varphi_{NZ}$ - 5 %)	
			$\Delta S_{max} = 0,1$ мм	$\Delta S_{max} = 0,2$ мм
1	$\{x\}_{min}$	0,10	0,1	0,101
	Q_2	0,11	0,12	0,27
	$\{x\}_{max}$	0,30	0,30	0,30
2	$\{x\}_{min}$	0,10	0,10	0,20
	Q_2	0,10	0,11	0,22
	$\{x\}_{max}$	0,30	0,30	0,30
3	$\{x\}_{min}$	0,10	0,10	0,20
	Q_2	0,11	0,11	0,22
	$\{x\}_{max}$	0,30	0,30	0,30
4	$\{x\}_{min}$	0,10	0,10	0,20
	Q_2	0,11	0,11	0,22
	$\{x\}_{max}$	0,16	0,17	0,30
5	$\{x\}_{min}$	0,10	0,10	0,20
	Q_2	0,14	0,26	0,30
	$\{x\}_{max}$	0,30	0,30	0,30
6	$\{x\}_{min}$	0,10	0,10	0,131
	Q_2	0,10	0,11	0,23
	$\{x\}_{max}$	0,30	0,30	0,30
7	$\{x\}_{min}$	0,10	0,10	0,20
	Q_2	0,11	0,25	0,30
	$\{x\}_{max}$	0,30	0,30	0,30
8	$\{x\}_{min}$	0,10	0,10	0,131
	Q_2	0,11	0,11	0,22
	$\{x\}_{max}$	0,30	0,30	0,30

Таблиця 6.5 - Порівняльний аналіз стратегій пошарової побудови тестових моделей за статистичними характеристиками розподілу середньоарифметичної похибки формоутворення

№	Квартилі	Стратегії пошарової побудови		
		Змінний крок (за одним перерізом)	Змінний крок (з усічення $\Delta\varphi_{NZ} - 5 \%$)	
			$\Delta S_{max} = 0,1 \text{ мм}$	$\Delta S_{max} = 0,2 \text{ мм}$
1	$\{x\}_{min}$	0	0,0002	0,0002
	Q_2	0,011	0,012	0,014
	$\{x\}_{max}$	0,108	0,108	0,112
2	$\{x\}_{min}$	0,004	0,004	0,004
	Q_2	0,036	0,037	0,072
	$\{x\}_{max}$	0,157	0,140	0,205
3	$\{x\}_{min}$	0	0	0
	Q_2	0,011	0,011	0,022
	$\{x\}_{max}$	0,184	0,183	0,218
4	$\{x\}_{min}$	0,014	0,014	0,029
	Q_2	0,037	0,037	0,075
	$\{x\}_{max}$	0,095	0,133	0,214
5	$\{x\}_{min}$	0	0	0
	Q_2	0,0078	0,0084	0,0004
	$\{x\}_{max}$	0,217	0,217	0,217
6	$\{x\}_{min}$	0,0002	0,0002	0,0004
	Q_2	0,025	0,027	0,051
	$\{x\}_{max}$	0,0995	0,121	0,198
7	$\{x\}_{min}$	0	0	0
	Q_2	0,007	0,012	0,011
	$\{x\}_{max}$	0,142	0,112	0,198
8	$\{x\}_{min}$	0,0002	0,0002	0,0004
	Q_2	0,023	0,023	0,046
	$\{x\}_{max}$	0,0995	0,121	0,198

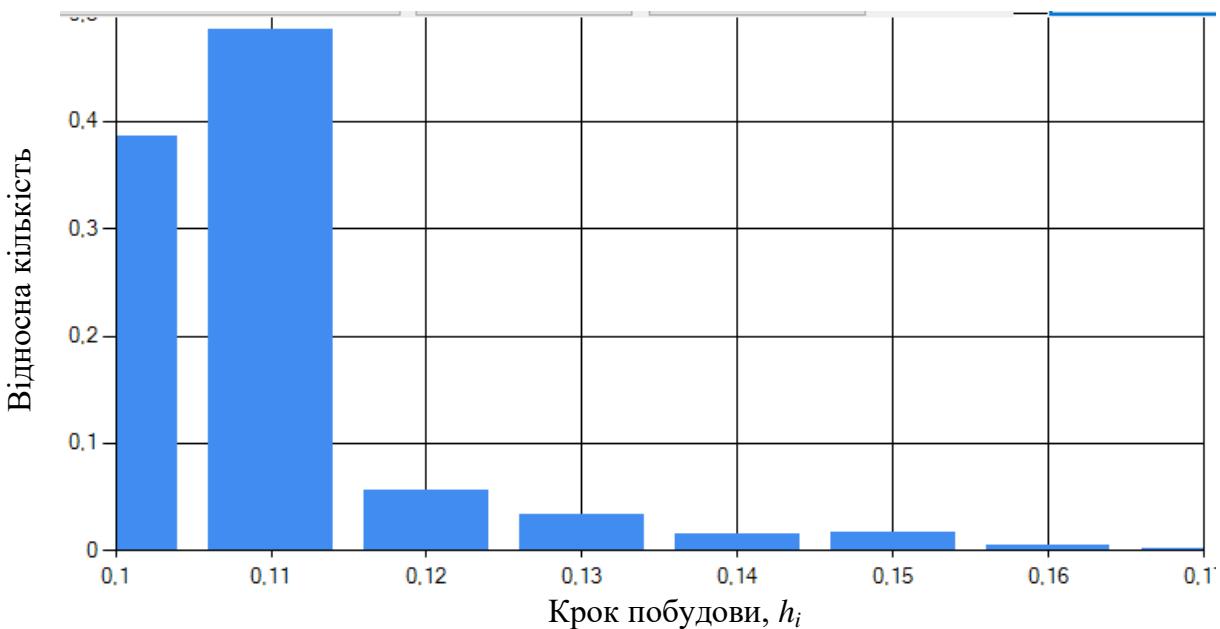
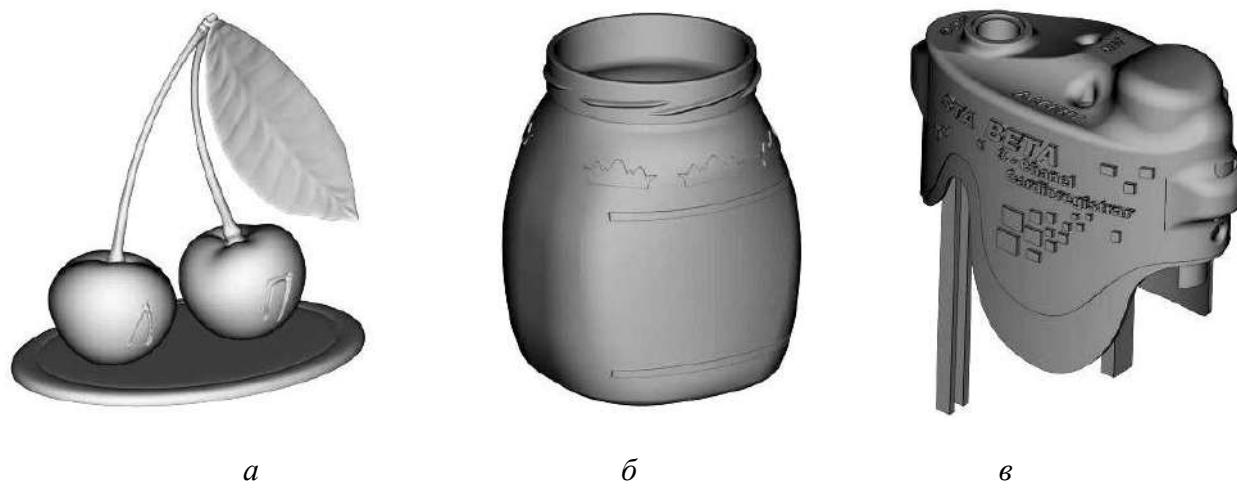


Рисунок 6.13 – Щільність розподілу кроку побудови для 4-го варіанту розміщення тестових моделей промислових виробів (табл. 6.3) при допустимій похибці формоутворення $\Delta_{Smax} = 0,1$ мм та усіченні площині поверхні $\Delta\varphi_{NZ} = 5\%$

У наступному підрозділі розглянуто можливості дослідження у розробленій системі технологічної підготовки на прикладі 3D-моделей промислових виробів зі складною геометрією поверхонь.

6.2.2 Промислові вироби зі складною геометрією поверхонь

Дослідження виконувалось аналогічно як для виробів із простою геометрією поверхонь. Вибрані тестові моделі представлено на рис. 6.14.



a) сувенір; *б)* ємність; *в)* кришка

Рисунок 6.14 - Тестові 3D-моделі

Дані розрахунків за кількістю оптимальних варіантів раціональної орієнтації при виготовленні поодиноких виробів наведено в табл. 6.6.

Таблиця 6.6 - Порівняльний аналіз за кількістю раціональних варіантів орієнтації для тестових моделей промислових виробів

№	Модель (габаритні розміри, мм)	Критерії оптимізації			
		Висота побудови, $H_{поб}$	Відносна площа поверхні S_{NZ} з кутами нахилу нормалей Φ_{NZ}		
			$(0^\circ, 45^\circ]$	$(60^\circ, 120^\circ)$	$[135^\circ, 180^\circ)$
1	Сувенір (73×51×70)	56,8%	74,1%	67,9%	75,3%
2	Ємність (102x94x125)	44,4%	38,3%	21,0%	40,7%
3	Кришка (84×101×43)	37,0%	74,1%	67,9%	74,1%

За даними розрахунків (з табл. 6.6) найбільш придатними за конструкцією для комплексного рішення задач оптимізації є 3D-моделі сувеніра та кришки. Щодо поодинокого пошарового виготовлення 3D-модель сувеніру найбільш краще підходить, а 3D-модель кришки найменш придатна.

Щільність розподілу кутів Φ_{NZ} для одного з оптимальних варіантів орієнтації сувеніру, ємності та кришки представлено на рис. 6.15-6.17 відповідно. На рис. 6.18 представлено один з оптимальних варіантів розміщення тестових 3D-моделей на платформі SLS-установки 3D Systems Vanguard.

Результати розрахунків кількості шарів для різних стратегій пошарової побудови зведені в табл. 6.7. У дослідженні розглянуто найбільш ефективні варіанти орієнтації з позицій мінімальних похибок форми (відхилень від правильної початкової форми, заданої 3D-моделлю виробу).

Наведені розрахункові дані у табл. 6.7 дозволяють обґрунтовано визначити орієнтацію виробу при побудові з використанням адаптивної стратегії пошарової побудови, що має перемінний крок.

Виходячи з одержаних даних (табл. 6.7), найбільший вплив має

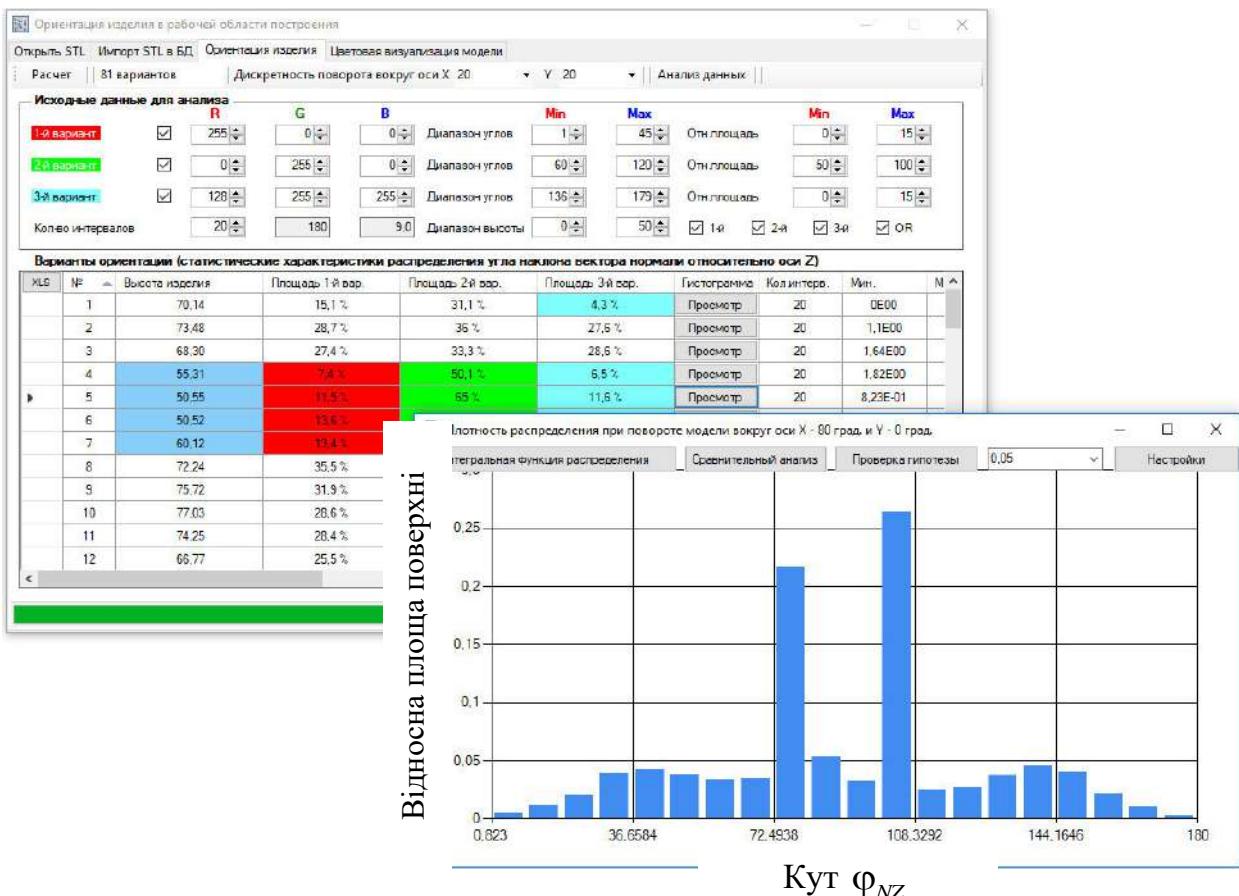


Рисунок 6.15 – Статистичний аналіз кутів ϕ_{NZ} для одного з оптимальних варіантів орієнтації сувеніру

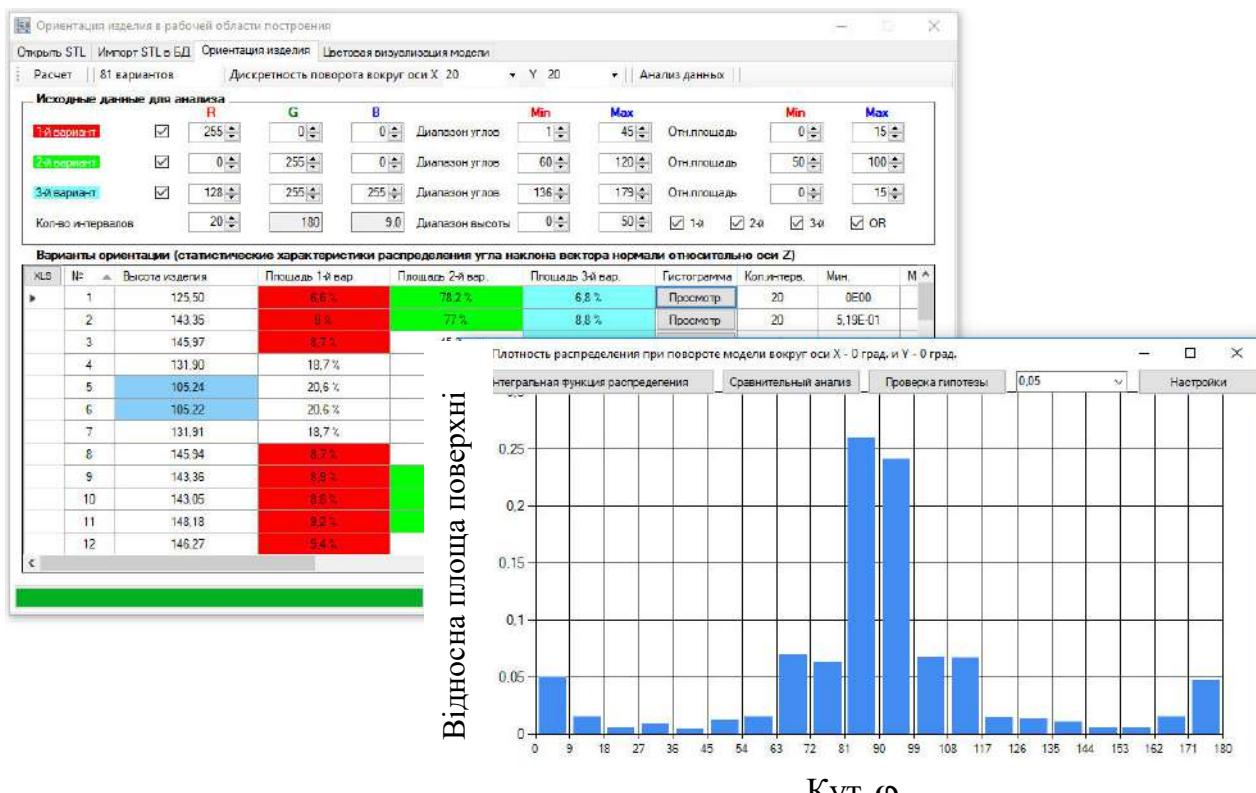


Рисунок 6.16 – Статистичний аналіз кутів ϕ_{NZ} для одного з оптимальних варіантів орієнтації ємності



Рисунок 6.17 – Статистичний аналіз кутів φ_{NZ} для одного з оптимальних варіантів орієнтації кришки

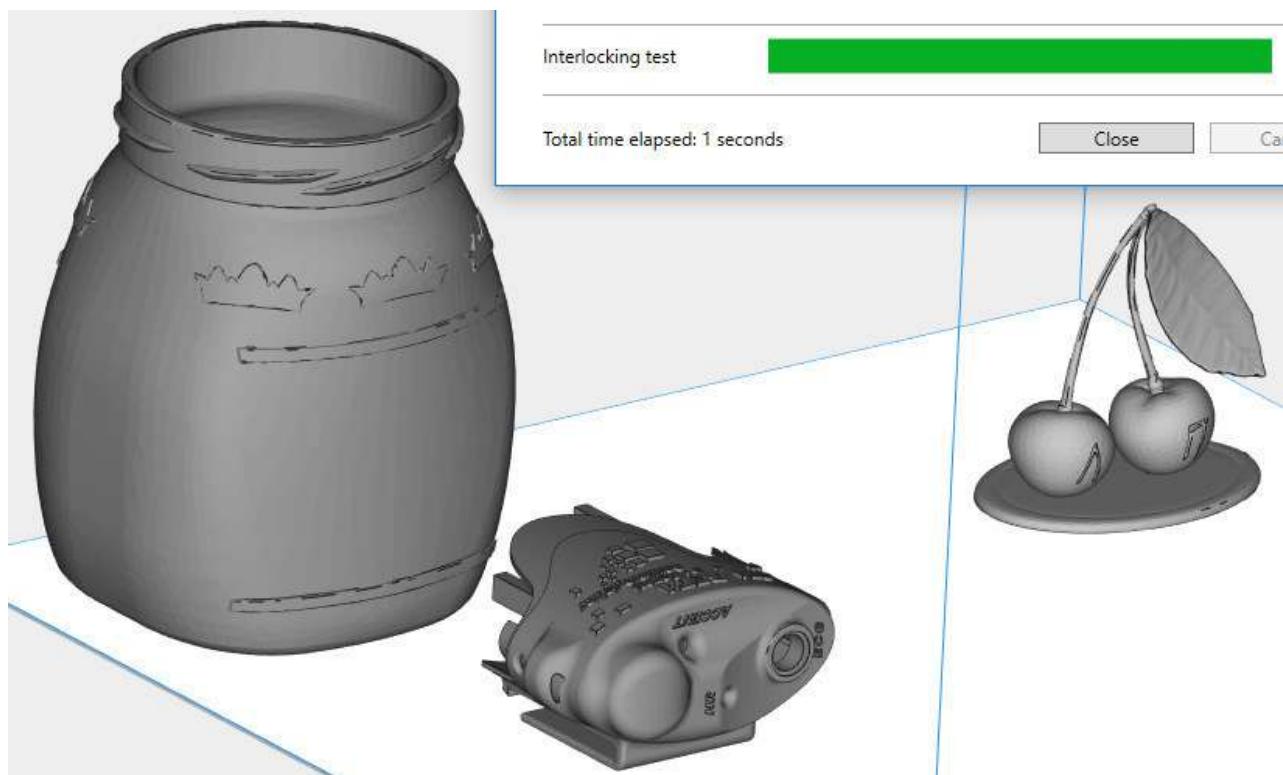
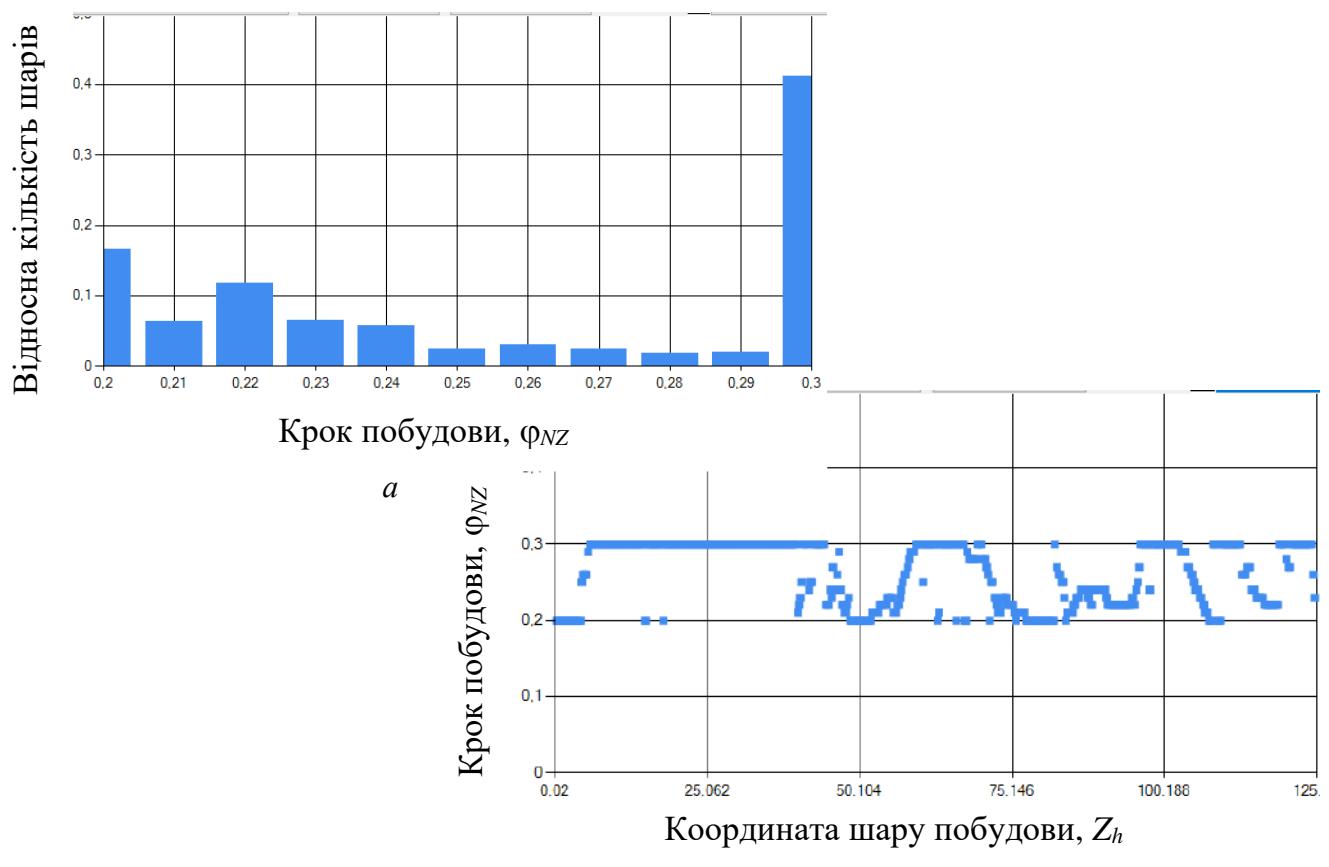


Рисунок 6.18 – Варіант розміщення тестових 3D-моделей на платформі установки 3D Systems Vanguard

Таблиця 6.7 - Результати аналізу стратегій пошарової побудови тестових 3D-моделей виробів із складною геометрією за одну загрузку

№	Кут повороту			Стратегії пошарової побудови		
	3D моделі навколо власної осі X			Змінний крок (без усічення)	Змінний крок (з усічення розподілу $\Delta\varphi_{NZ}$ - 5 %)	
	сувенір	ємність	кришка		$\Delta S_{max} = 0,1$ мм	$\Delta S_{max} = 0,2$ мм
1	0°	0°	0°	934	743	472
2	0°	0°	90°	1027	688	456
3	0°	90°	0°	831	715	389
4	0°	90°	90°	938	724	405
5	90°	0°	0°	896	737	473
6	90°	0°	90°	1101	744	467
7	90°	90°	0°	815	716	392
8	90°	90°	90°	960	745	413



Значення квартилей: 0 - 0,2; 1 - 0,22; 2 - 0,26; 3 - 0,3; 4 - 0,3.

Рисунок 6.19 – Щільності розподілу кроку побудови (а) і його залежності від координат площин перетинів по осі Z (б) для 7-го варіанту розміщення тестових моделей виробів із складною геометрією при допустимому відхиленні від правильної форми $\Delta S_{max} = 0,2$ мм та усіченні розподілу $\Delta\varphi_{NZ}$ - 5%

допустима похибка формоутворення, що дозволяє при збільшенні її величини удвічі зменшити кількість кроків на 28÷45,6% у залежності від вибраної орієнтації. Усічення площин для гістограм розподілу кута φ_{NZ} на 5% дозволяє зменшити кількість кроків на 12,1÷33,0%. Ефективність від використання стратегії пошарового розділення з усіченням збільшується для варіантів з кращою (більш раціональною) орієнтацією виробів. Найраціональнішим виявився 7-й варіант.

Основною дослідженою ознакою є крок побудови. Статистичний аналіз кроку побудови на прикладі 7-го варіанту розміщення на робочій платформі установки представлено на рис. 6.19. Представлені статистичні дані дозволяють оцінити потенціал для подальшого удосконалення технічних підходів по підвищенню ефективності пошарової побудови розглянутих виробів.

6.3 Комплексна технологічна підготовка адитивного виготовлення групи виробів

У підрозділі представлено результати технологічної підготовки до виготовлення групи виробів різних типів, що відносяться до загального машинобудівного виробництва та мають поверхні простої та складної геометрії. Ефективність використання АМ-процесів та обладнання забезпечувалося виконанням декомпозиції виробів, вибором орієнтації та раціональним розташуванням в робочому просторі пошарової побудови АМ-установки.

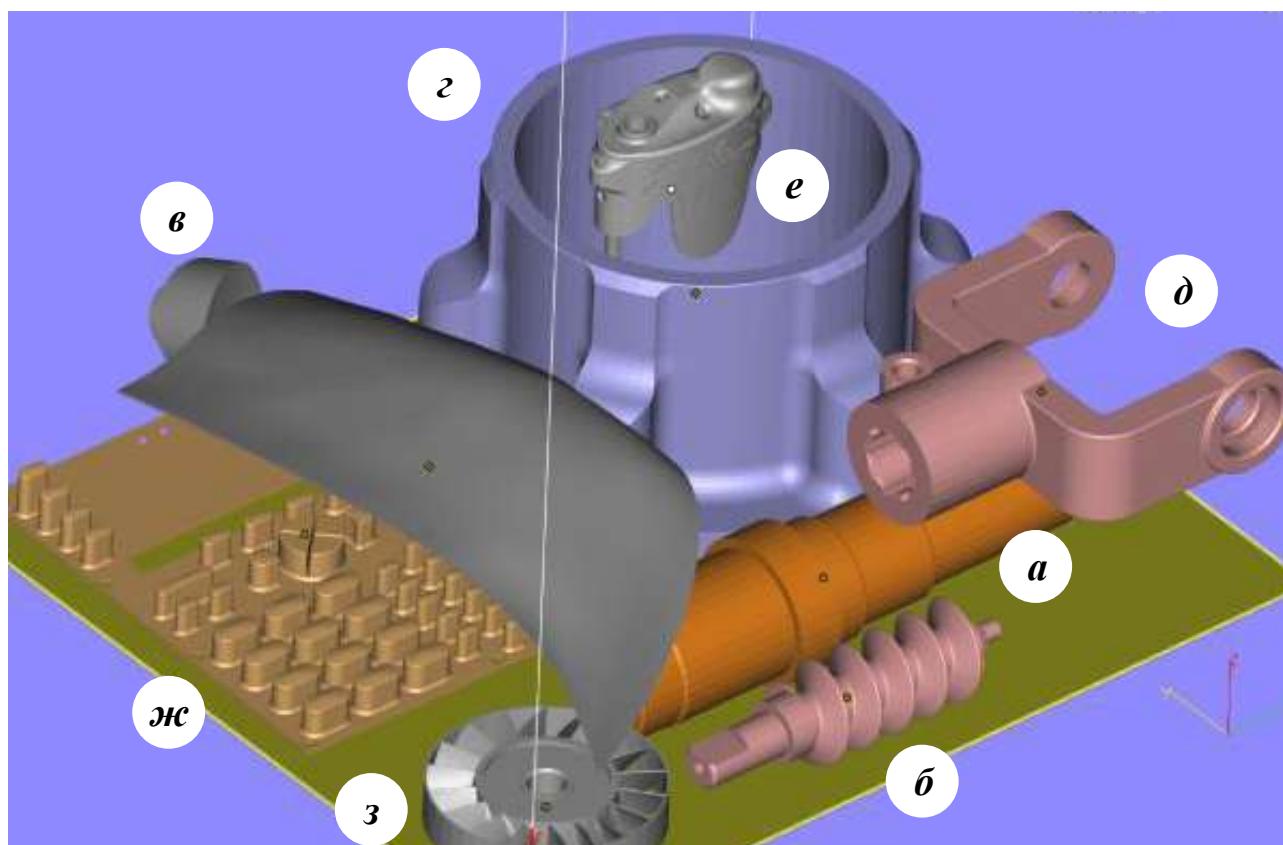
6.3.1 Моделі промислових виробів для адитивного виробництва

Підготовка до виробництва 3D-моделей виробів (рис. 6.20) виконувалася у системі технологічної підготовки матеріалізації складних виробів адитивними методами. Візуалізація 3D-моделей реалізовувалася у вузькоспеціалізованій CAD-системі Magics (Demo-версія).

Початкові дані 3D-моделей виробів, підготовлених до адитивного виготовлення представлено в табл. 6.8.

Таблиця 6.8 – Характеристики 3D-моделей промислових виробів, що потребують підготовки до пошарової побудови адитивними методами

Хар-ка	Вироби (рис. 6.20)							
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>δ</i>	<i>e</i>	<i>ж</i>	<i>з</i>
Розміри (<i>LxBxH</i>), мм	59,9x 216,5x 59,9	40x 40x 144	151,7x 138,7x 262,4	125,0x 210,0x 210,0	147,5x 50,0x 124,0	83,8x 101,3x 43,2	151,5x 195,5x 20,0	26,0x 92,0x 92,0
Кількість трикутників, шт	1 870	10 366	33 480	13 306	5 148	104 330	22 096	11 754
Площа поверхні, мм ²	38 251,8	17 890,9	83 405,4	172 396,8	48 766,0	30 286,3	81 229,6	34 136,3
Об'єм моделі, мм ³	377 648	65 397	248 715	903 302	215 087	33 777	79 245	36 022



a - вал; *б* - шнек; *в* - лопата; *г* - корпус; *δ* - карданний вал;
е - кришка; *ж* - панель; *з* - вентилятор

Рисунок 6.20 – 3D-моделі промислових виробів

6.3.2 Структурна оборотна декомпозиція виробів

Першою задачею технологічної підготовки 3D-моделей виробів для їх матеріалізації адитивними технологіями є виконання структурної декомпозиції [73]. Данна задача виконується тільки в разі необхідності. В першу чергу в тих випадках, коли виріб не може бути виготовлений на обраному обладнанні через неможливість його розташування в межах робочого простору пошарової побудови.

Виходячи з потреби одержання SLS-виробів виробництво базується на установці Vanguard 2Si (виробництва 3D-систем), що реалізує SLS технологію пошарової побудови.

Розміри робочого простору установки Vanguard 2Si: ширина (X) - 380 мм, глибина (Y) - 330 мм, висота (Z) - 455 мм. З урахуванням дозволеної дистанції до країв платформи, розмірами робочого простору для побудови виробів є ширина (X) - 330 мм, глибина (Y) - 280 мм та висота (Z) - 420 мм.

У відповідності за розмірами та складністю конфігурації (конструкції) по кожному з виробів прийнято рішення щодо виконання структурної зворотної декомпозиції, представлене у табл. 6.9.

Таблиця 6.9 – Рішення, щодо необхідності виконання структурної зворотної декомпозиції виробів для задач раціональної орієнтації і розміщення їх у робочому просторі установки

Рішення по виконанню декомпозиції, для забезпечення розміщення у робочому просторі установки	Вироби (см. рис. 3.1)							
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>δ</i>	<i>ε</i>	<i>ж</i>	<i>з</i>
мінімальної площі поверхонь з небажаним відхиленням від правильної форми	так	ні	так	ні	так	ні	ні	ні
мінімальної кількості шарів побудови	так	так	ні	так	ні	так	ні	ні
максимального заповнення робочого простору установки	так	ні	так	так	так	ні	ні	ні
висновок, щодо необхідності виконання	так	ні	так	ні	так	ні	ні	ні

Виконання структурної зворотної декомпозиції дозволяє збільшити ефективність виконання задач раціональної орієнтації і розміщення виробів у робочому просторі установки [311, 312]. При спільному виконанні задач технологічної підготовки необхідно орієнтацію виробу обирати за критерієм мінімальної площини поверхонь з небажаним (з найбільшим за величиною) відхиленням від правильної форми та мінімальної кількості шарів побудови. Розташування виробу виконувалось у робочому просторі за критерієм мінімальної кількості шарів побудови та максимального заповнення робочого простору установки.

Далі розглянуто задачу визначення раціональної орієнтації заданих 3D-моделей виробів та/або їх частин після виконання структурної зворотної декомпозиції. Декомпозицію виконували шляхом січення виробу площинами на частини за критерієм рівних їхніх габаритних розмірів або об'ємів.

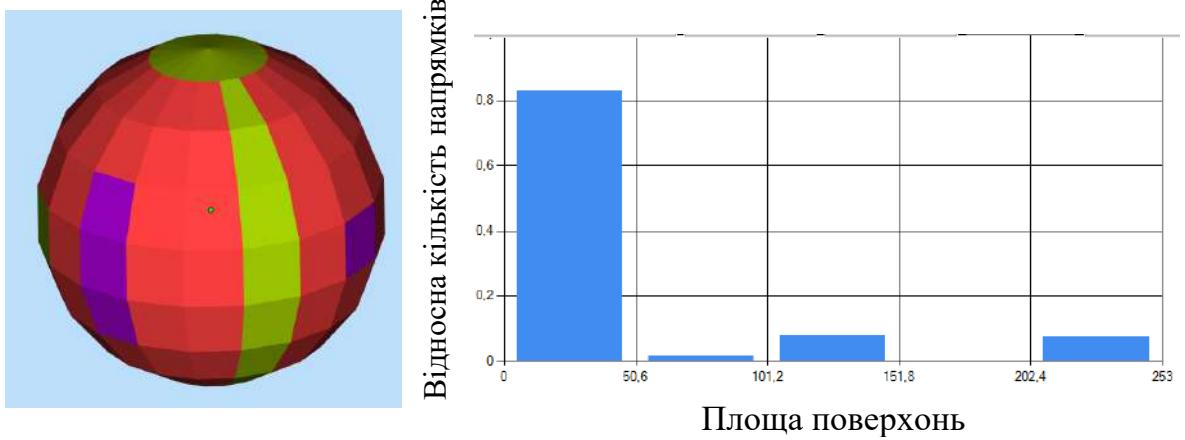
6.3.3 Визначення орієнтації виробів

Спершу було визначено технологічність виробів щодо раціональної орієнтації для пошарової побудови шляхом візуального аналізу та сферичного відображення 3D-моделі виробу (рис. 6.21-6.28). Крім того визначався коефіцієнт технологічності K_o по коефіцієнту концентрації розподілу площин поверхонь по напрямкам їх орієнтації (за сферичним відображенням, як представлено у роботі [313]). Порівняльний аналіз коефіцієнтів K_o поміж виробів представлено на рис. 6.29.

Визначення раціональної орієнтації 3D-моделей виробів виконувалося на основі мінімізації площин поверхонь з найбільш вираженим ступінчатим ефектом. К таким поверхням відносяться наступні кути нахилу нормалей $\varphi_{NZ} \in (0^\circ, 45^\circ] \cup \varphi_{NZ} \in [135^\circ, 180^\circ)$ [314].

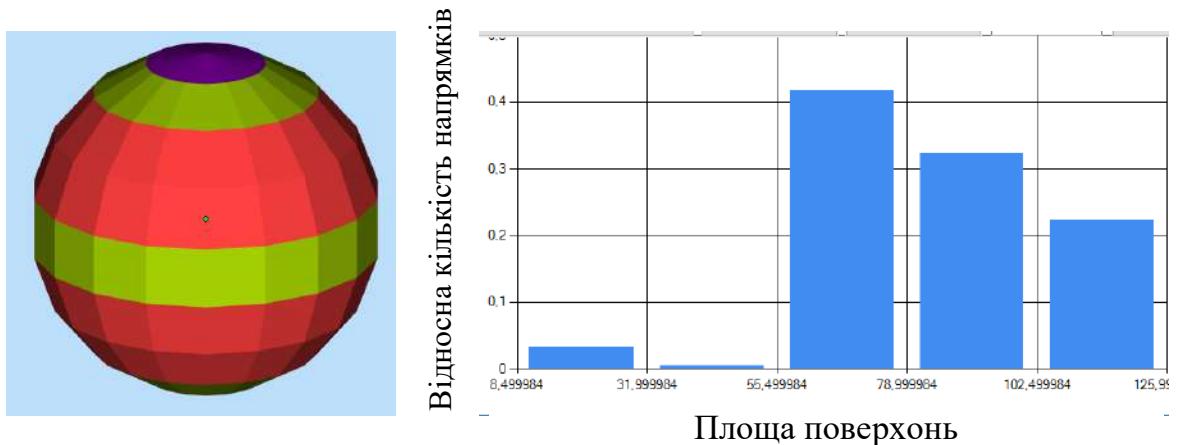
Одержані результати розподілу площин поверхонь щодо кутів між нормальними та вектором побудови представлено на рис. 6.30-6.32 і табл. 6.10.

Надалі представлено отримані варіанти розподілу площин поверхонь за кутом φ_{NZ} для декількох вибраних напрямків орієнтації (кутів повороту 3D-



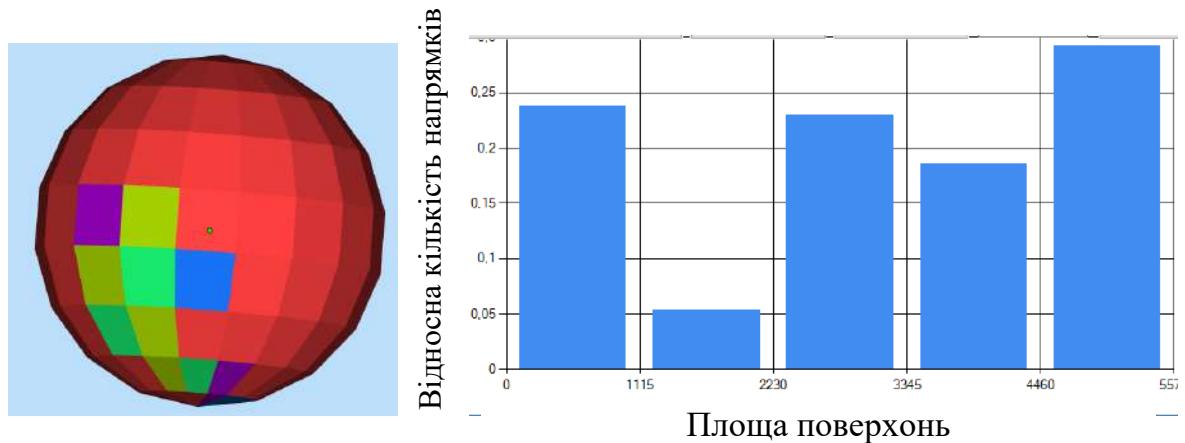
Коефіцієнт технологічності, щодо раціональної орієнтації $K_o = 0,722$

Рисунок 6.21 – Перевірка моделі валу, щодо можливості та ефективності визначення раціональної орієнтації



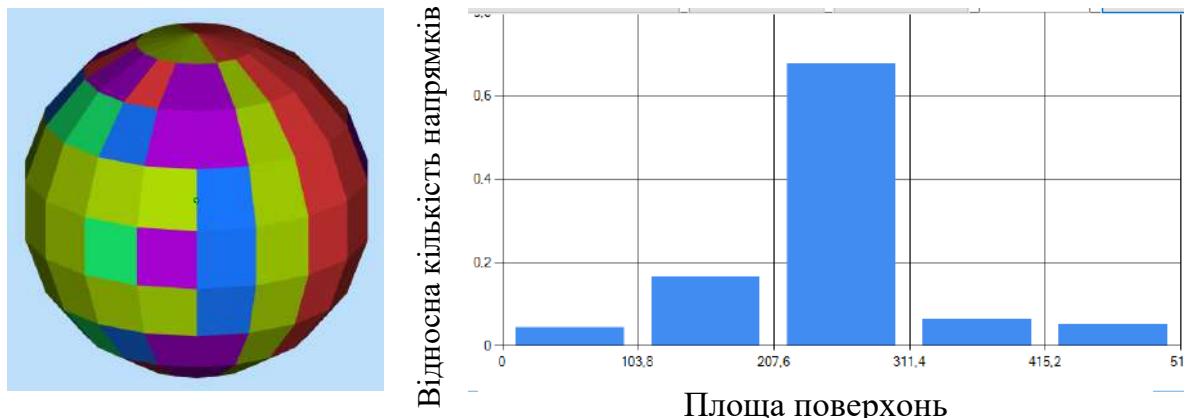
Коефіцієнт технологічності, щодо раціональної орієнтації $K_o = 0,481$

Рисунок 6.22 – Перевірка моделі шнеку, щодо можливості та ефективності визначення раціональної орієнтації



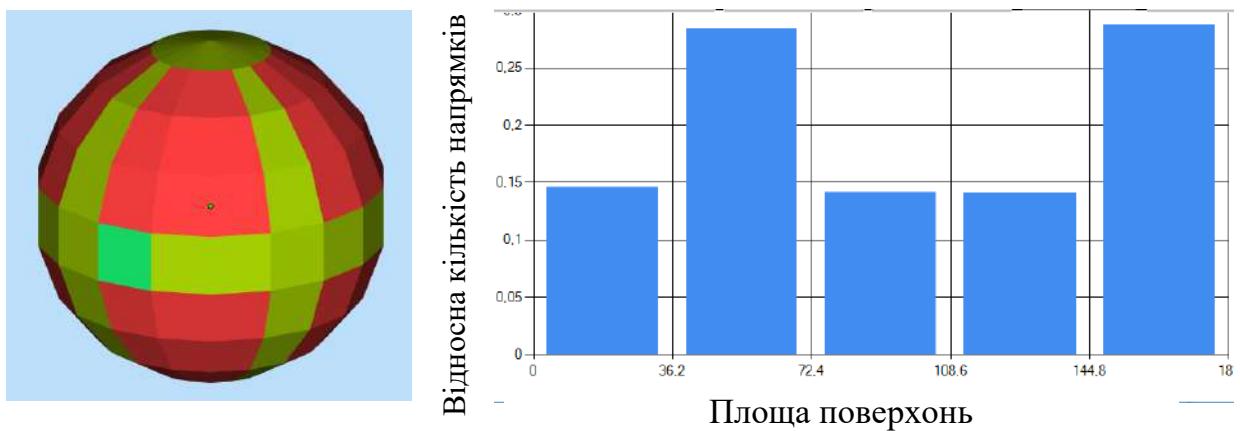
Коефіцієнт технологічності, щодо раціональної орієнтації $K_o = 0,767$

Рисунок 6.23 – Перевірка моделі лопаті, щодо можливості та ефективності визначення раціональної орієнтації



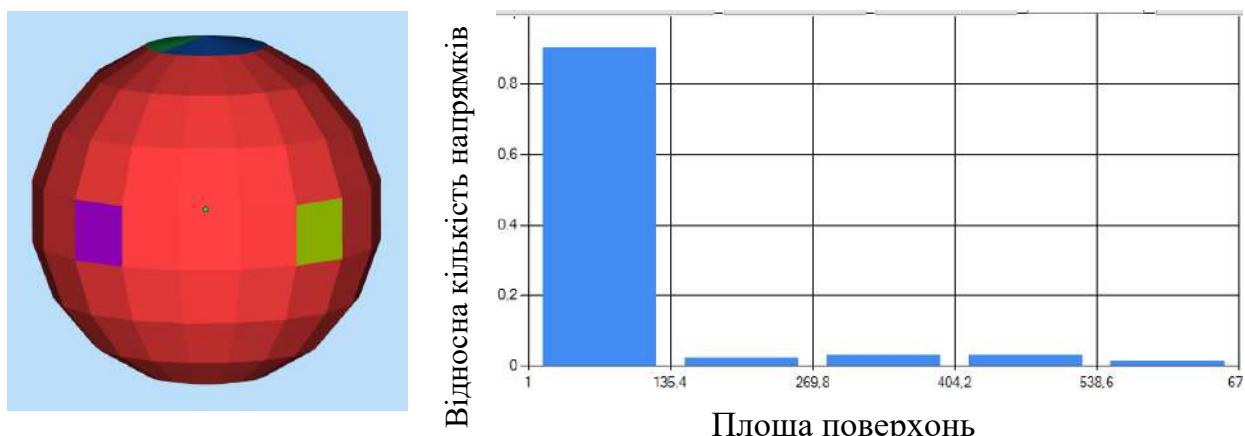
Коефіцієнт технологічності, щодо раціональної орієнтації $K_o = 0,733$

Рисунок 6.24 – Перевірка моделі корпусу, щодо можливості та ефективності визначення раціональної орієнтації



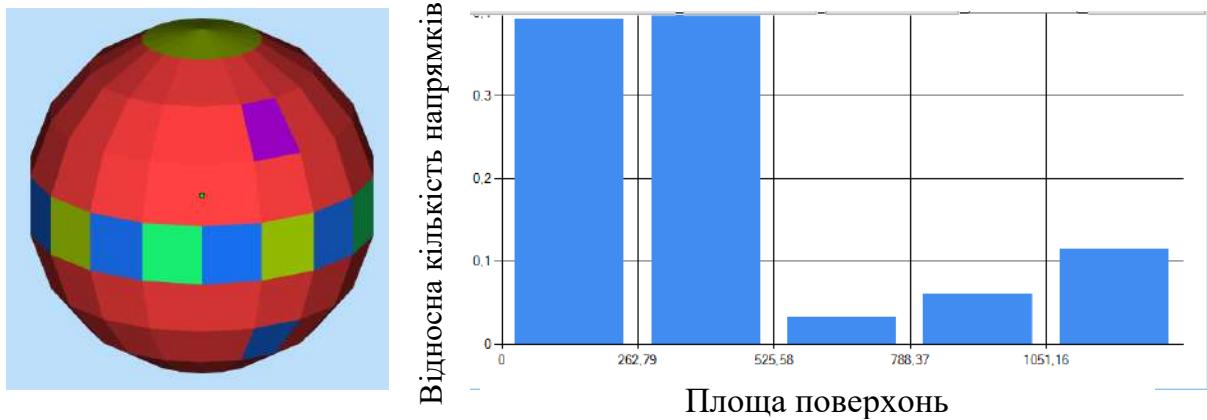
Коефіцієнт технологічності, щодо раціональної орієнтації $K_o = 0,596$

Рисунок 6.25 – Перевірка моделі карданного валу, щодо можливості та ефективності визначення раціональної орієнтації



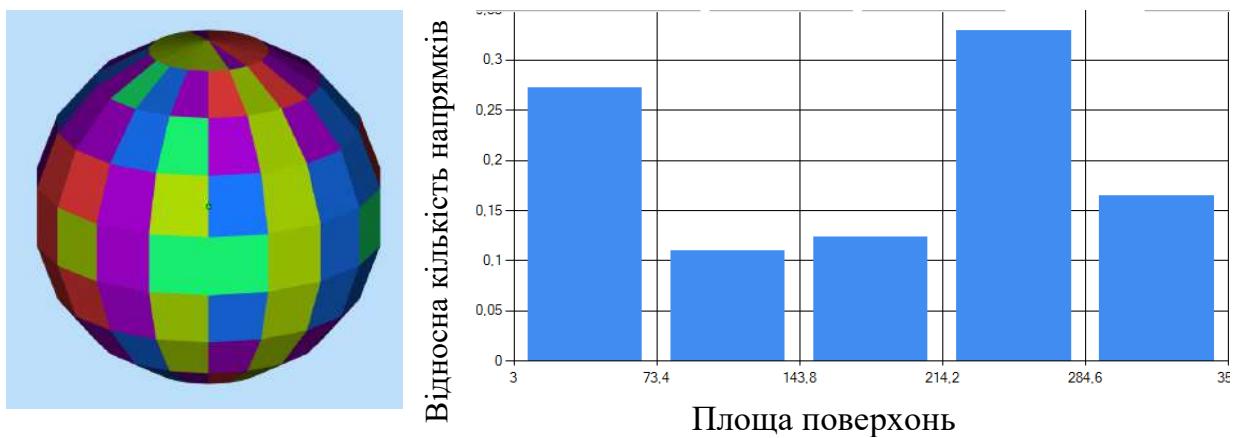
Коефіцієнт технологічності, щодо раціональної орієнтації $K_o = 0,546$

Рисунок 6.26 – Перевірка моделі кришки, щодо можливості та ефективності визначення раціональної орієнтації



Коефіцієнт технологічності, щодо раціональної орієнтації $K_o = 0,648$

Рисунок 6.27 – Перевірка моделі панелі, щодо можливості та ефективності визначення раціональної орієнтації



Коефіцієнт технологічності, щодо раціональної орієнтації $K_o = 0,448$

Рисунок 6.28 – Перевірка моделі вентилятора, щодо можливості та ефективності визначення раціональної орієнтації

Порівняльний аналіз коефіцієнтів K_o представлено на рис. 6.29.

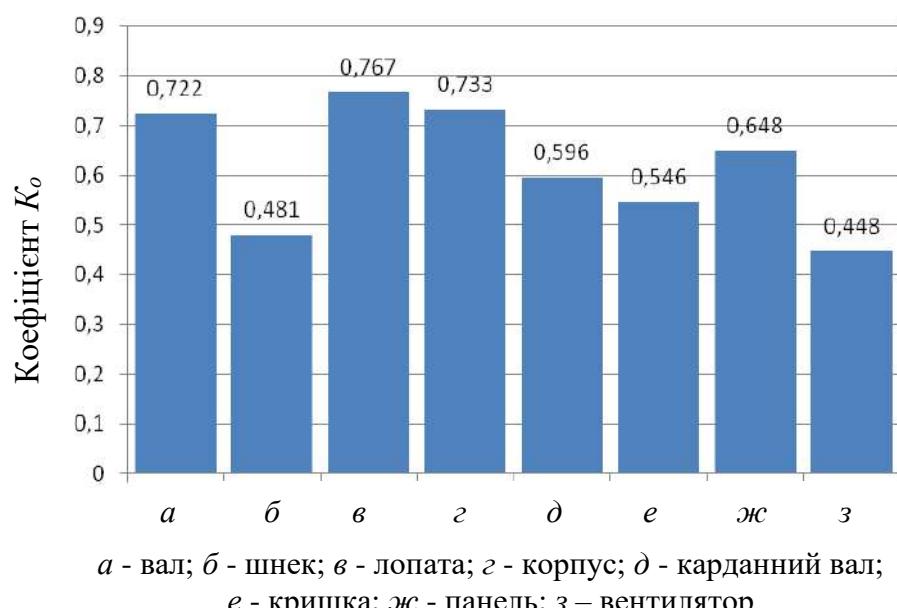


Рисунок 6.29 – Порівняльний аналіз 3D-моделей за коефіцієнтом K_o

моделі) на рис. 6.31. Гістограми розподілу S_{NZ} мають істотні відмінності в залежності від вибраної орієнтації 3D-моделі виробу. Є варіанти орієнтації, що є дуже привабливими, к ним відносяться два варіанта. Перший, з кутами повороту 90° і 0° навколо осей X , Y відповідно, та другий – 90° та 45° .

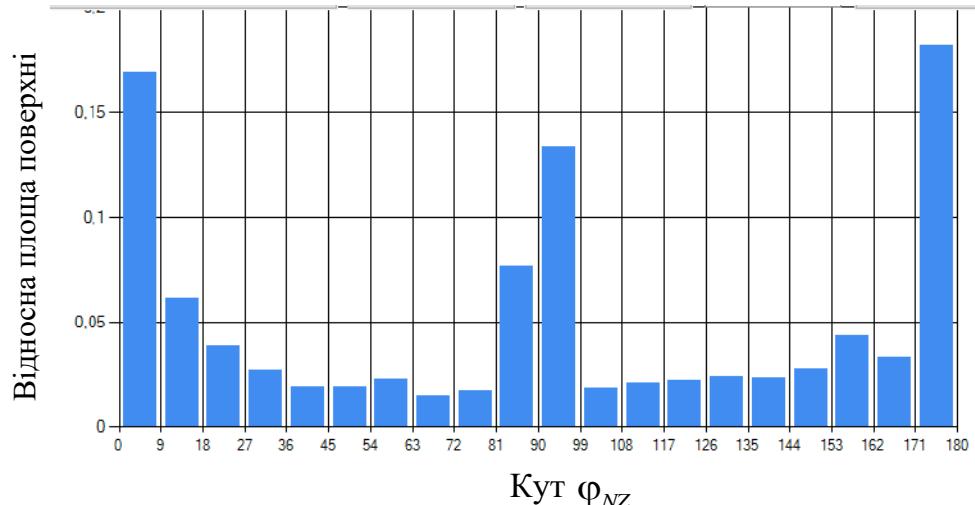


Рисунок 6.30 – Перший варіант орієнтації 3D-моделі кришки.

Розподіл відносної площи поверхонь за кутом між нормальню та вектором напрямку побудови φ_{NZ}

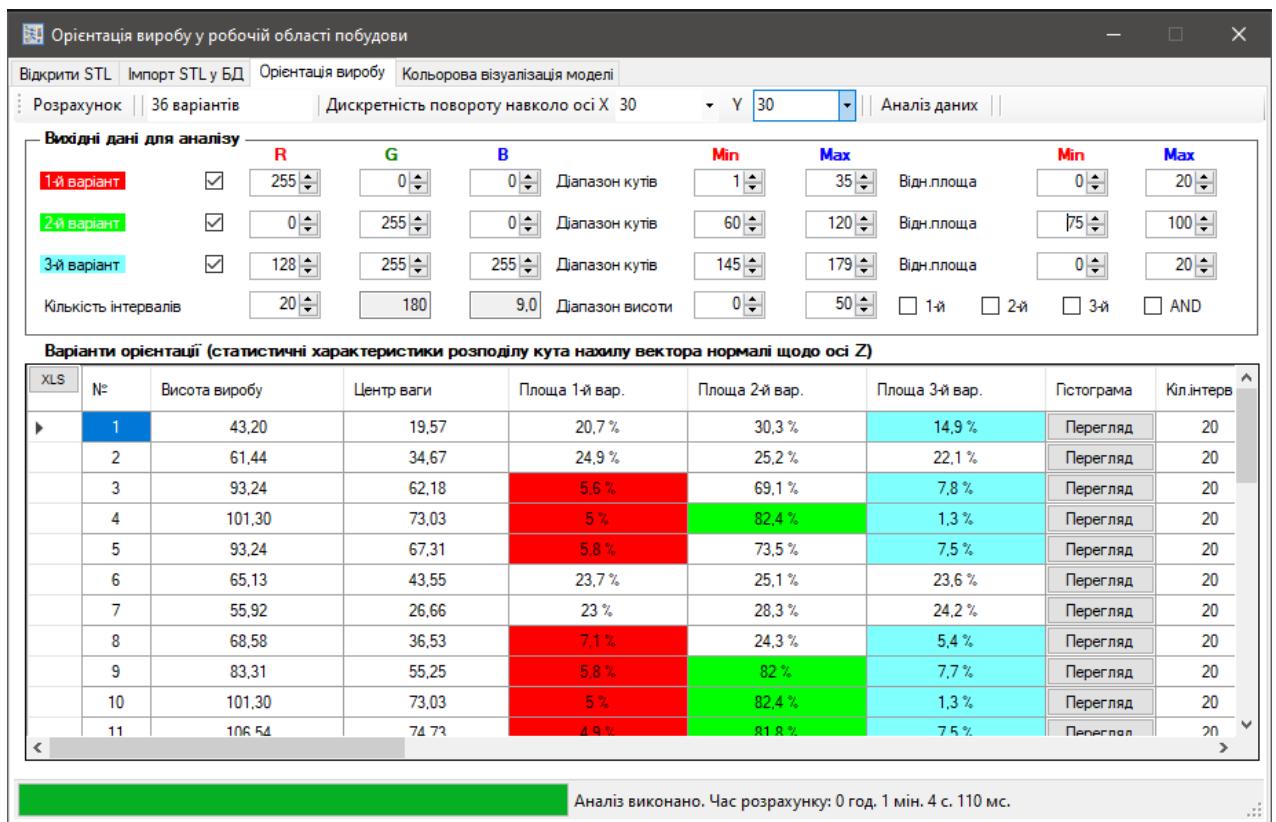


Рисунок 6.32 – Форма аналізу орієнтації моделі з налаштуваннями та результатами на прикладі 3D-моделі кришки

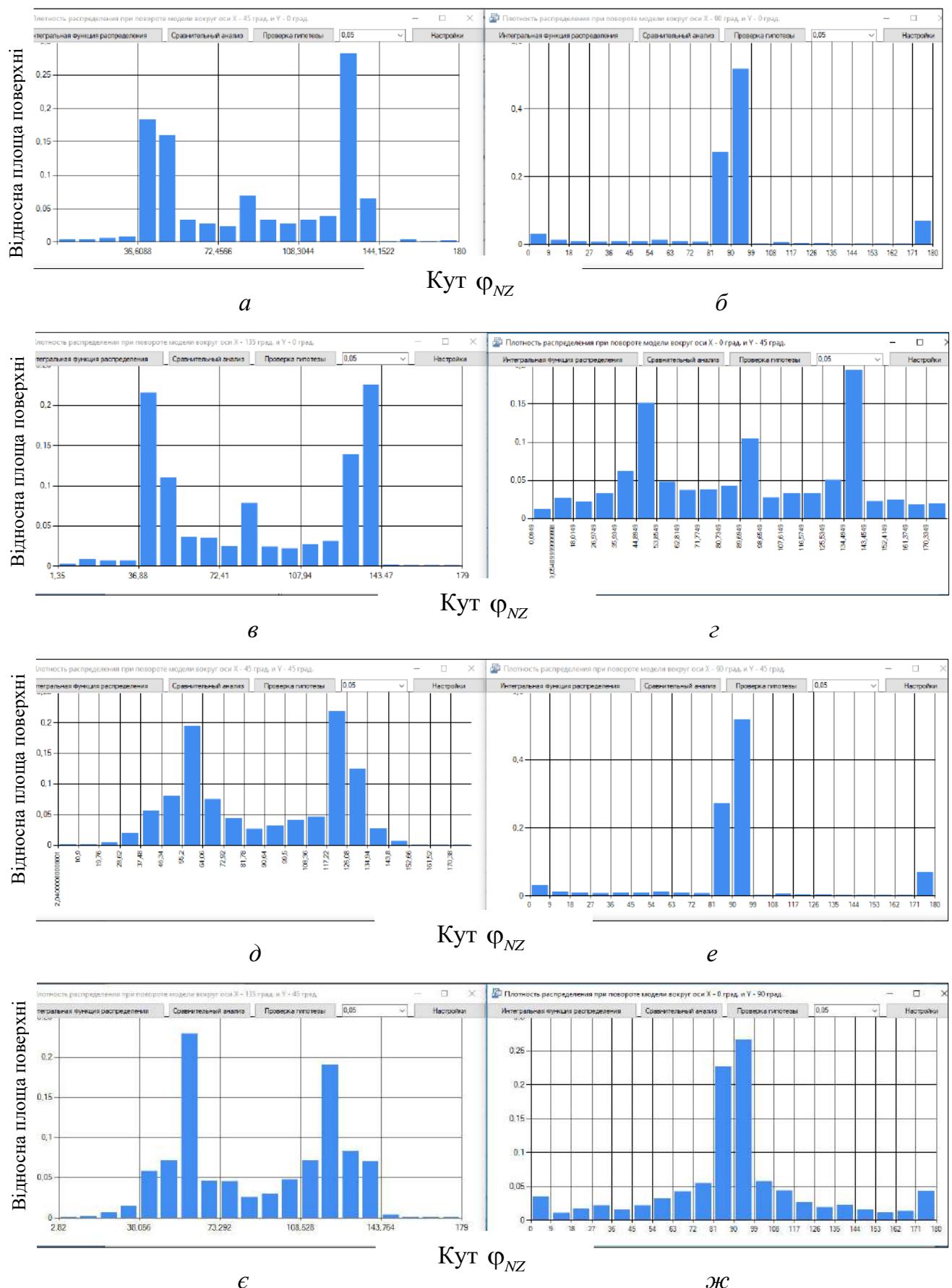


Рисунок 6.31 – Деякі варіанти орієнтації 3D-моделі кришки. Розподіл площин поверхонь за кутом між нормальню та вектором напрямку побудови φ_{NZ}

Таблиця 6.10 - Площа поверхонь за інтервалами кутів φ_{NZ} для 3D-моделі кришки

№	Висота виробу, мм	Площа поверхонь за інтервалами кутів φ_{NZ}			Мода кутів φ_{NZ}	Кут повороту 3D-моделі навколо осі	
		1÷35	60÷120	145÷179		X	Y
1	43,21	21,7 %	14,9 %	16,9 %	1,76E02	0	0
2	79,85	4,9 %	5,4 %	1,1 %	1,31E02	45	0
3	101,22	6,2 %	75,1 %	1,7 %	9,45E01	90	0
4	79,83	7,7 %	5,5 %	0,8 %	1,39E02	135	0
5	62,42	18,7 %	8,1 %	11,1 %	1,39E02	0	45
6	75,34	6%	0,5 %	1,9 %	1,22E02	45	45
7	101,22	6,2 %	75,1 %	1,7 %	9,45E01	90	45
8	106,40	4,3 %	0,6 %	1%	6,00E01	135	45
9	83,92	8,6 %	34,5 %	7,2 %	9,45E01	0	90
10	80,60	5,1 %	24,9 %	1,4 %	8,58E01	45	90
11	101,22	6,2 %	75,1 %	1,7 %	9,45E01	90	90
12	116,47	3%	24,7 %	0,9 %	8,57E01	135	90
13	63,76	18,3 %	8,5 %	14,4 %	4,07E01	0	135
14	74,94	5,9 %	0,7 %	1,5 %	6,07E01	45	135
15	101,22	6,2 %	75,1 %	1,7 %	9,45E01	90	135
16	106,28	4%	0,8 %	1,4 %	5,9E01	135	135

Таблиця 6.11 - Площа поверхонь за інтервалами кутів φ_{NZ} для 3D-моделі валу

№	Висота виробу, мм	Площа поверхонь за інтервалами кутів φ_{NZ}			Мода кутів φ_{NZ}	Кут повороту навколо осі	
		1÷35	60÷120	145÷179		X	Y
1	59,93	15,8 %	45,2 %	15,4 %	9,41E01	0	0
2	183,48	0,4 %	44,4 %	0,4 %	4,19E01	45	0
3	216,50	0,2 %	83,7 %	0,2 %	9,45E01	90	0
4	183,48	0,3 %	44,4 %	0,5 %	1,38E02	135	0
5	59,95	15,3 %	42,3 %	15,7 %	8,56E01	0	45
6	183,46	0,4 %	44,4 %	0,5 %	1,3E02	45	45
7	216,50	0,2 %	83,7 %	0,2 %	9,45E01	90	45
8	183,46	0,4 %	44,4 %	0,6 %	1,3E02	135	45
9	59,95	16,5 %	42,4 %	16,7 %	8,56E01	0	90
10	183,48	0,5 %	42,6 %	0,6 %	1,3E02	45	90
11	216,50	0,2 %	83,7 %	0,2 %	9,45E01	90	90
12	183,48	0,5 %	42,6 %	0,6 %	1,3E02	135	90
13	59,92	15,4 %	43,2 %	15,6 %	9,41E01	0	135
14	183,46	0,4 %	42,5 %	0,6 %	5,00E+01	45	135
15	216,50	0,2 %	83,7 %	0,2 %	9,45E01	90	135
16	183,46	0,4 %	42,5 %	0,5 %	1,3E02	135	135

Таблиця 6.12 - Площа поверхонь за інтервалами кутів φ_{NZ} для 3D-моделі лопатки

№	Висота виробу, мм	Площа поверхонь за інтервалами кутів φ_{NZ}			Мода кутів φ_{NZ}	Кут повороту навколо осі	
		1÷35	60÷120	145÷179		X	Y
1	262,39	6,7 %	64,8 %	8,3 %	7,65E01	0	0
2	265,23	0%	96,6 %	0%	9,13E01	45	0
3	138,77	0,9 %	89,4 %	0,6 %	1,04E02	90	0
4	192,87	7,8 %	56,2 %	7,6 %	7,33E01	135	0
5	137,49	29%	3,5 %	33,3 %	3,85E01	0	45
6	182,62	0,9 %	76,4 %	0,4 %	7,06E01	45	45
7	138,77	0,9 %	89,4 %	0,6 %	1,04E02	90	45
8	112,68	19,7 %	3,4 %	19,8 %	1,37E02	135	45
9	151,71	29,4 %	19,8 %	27,7 %	2,25E01	0	90
10	168,40	1,3 %	71,6 %	0,7 %	5,87E01	45	90
11	138,77	0,9 %	89,4 %	0,6 %	1,04E02	90	90
12	173,26	15%	14,7 %	20%	1,48E02	135	90
13	284,45	1%	68,4 %	0,6 %	5,91E01	0	135
14	214,85	0,5 %	83,1 %	0,5 %	7,9E01	45	135
15	138,77	0,9 %	89,4 %	0,6 %	1,04E02	90	135
16	270,89	0,3 %	67,2 %	0,3 %	1,26E02	135	135

Результати розподілу поверхонь 3D-моделі карданного валу за трьома інтервалами кутів φ_{NZ} представлено у табл. 6.13.

Таблиця 6.13 - Площа поверхонь за інтервалами кутів φ_{NZ} для 3D-моделі карданного валу

№	Висота виробу, мм	Площа поверхонь за інтервалами кутів φ_{NZ}			Мода кутів φ_{NZ}	Кут повороту навколо осі	
		1÷35	60÷120	145÷179		X	Y
1	124,01	9,9 %	50,3 %	7,4 %	8,55E01	0	0
2	50,00	9,4 %	56,7 %	9,8 %	9,45E01	90	0
3	165,82	2,9 %	40,3 %	2,2 %	4,92E01	0	45
4	50,00	9,4 %	56,7 %	9,8 %	9,45E01	90	45
5	147,50	5,2 %	72,9 %	6%	9,45E01	0	90
6	50,00	9,4 %	56,7 %	9,8 %	9,45E01	90	90
7	165,53	3,9 %	41,2 %	1,1 %	4,26E01	0	135
8	50,00	9,4 %	56,7 %	9,8 %	9,45E01	90	135

Результати розподілу поверхонь 3D-моделі панелі й вентилятора за трьома інтервалами кутів φ_{NZ} представлено у табл. 6.14 і 6.15 відповідно.

Таблиця 6.14 - Площа поверхонь за інтервалами кутів φ_{NZ} для 3D-моделі панелі

№	Висота виробу, мм	Площа поверхонь за інтервалами кутів φ_{NZ}			Мода кутів φ_{NZ}	Кут повороту навколо осі	
		1÷35	60÷120	145÷179		X	Y
1	20,03	4,9 %	29,4 %	0 %	1,76E02	0	0
2	106,32	31,4 %	26,6 %	32,6 %	1,51E02	30	0
3	171,19	8,1 %	41,9 %	8,6 %	1,18E02	60	0
4	195,50	4,1 %	73 %	2,7 %	9,45E01	90	0
5	170,31	8,5 %	47,2 %	8,2 %	6,16E01	120	0
6	108,60	32,6 %	25,4 %	31,2 %	2,9E01	150	0
7	90,50	31,1 %	29,8 %	31,9 %	1,51E02	0	30
8	164,85	2,7 %	22,2 %	1,7 %	1,38E02	30	30
9	208,05	8,7 %	73,5 %	9,3 %	1,14E02	60	30
10	195,50	4,1 %	73 %	2,7 %	9,45E01	90	30
11	208,05	9,2 %	74,5 %	9,1 %	6,67E01	120	30
12	169,21	1,7 %	18,6 %	2,3 %	4,22E01	150	30
13	137,22	3,3 %	54,5 %	3,5 %	1,18E02	0	60
14	212,24	3 %	77,7 %	3,2 %	1,14E02	30	60
15	235,41	8,9 %	75,1 %	9,1 %	1,06E02	60	60
16	195,50	4,1 %	73 %	2,7 %	9,45E01	90	60
17	235,41	8,5 %	75,7 %	9 %	7,46E01	120	60
18	212,24	3 %	75,8 %	3 %	1,16E02	150	60

Таблиця 6.15 - Площа поверхонь за інтервалами φ_{NZ} для 3D-моделі вентилятору

№	Висота виробу, мм	Площа поверхонь за інтервалами кутів φ_{NZ}			Мода кутів φ_{NZ}	Кут повороту навколо осі	
		1÷35	60÷120	145÷179		X	Y
1	92,00	12,7 %	44,3 %	12,8 %	8,55E01	0	0
2	92,00	12,6 %	44,4 %	12,6 %	9,45E01	45	0
3	92,00	12,6 %	44,2 %	12,6 %	8,55E01	90	0
4	92,00	12,8 %	44,4 %	12,7 %	9,45E01	135	0
5	77,78	5,4 %	47,4 %	3,8 %	1,31E02	0	45
6	88,61	10,1 %	44,4 %	8,8 %	1,21E02	45	45
7	92,00	12,6 %	44,2 %	12,6 %	8,55E01	90	45
8	88,61	8,8 %	47,7 %	10 %	5,88E01	135	45
9	26,00	0,3 %	65,9 %	0,3 %	9,45E01	0	90
10	77,78	5,4 %	46,9 %	3,9 %	1,39E02	45	90
11	92,00	12,6 %	44,2 %	12,6 %	8,55E01	90	90
12	77,78	3,9 %	46,9 %	5,4 %	4,08E01	135	90
13	77,78	5,4 %	47,3 %	3,8 %	1,31E02	0	135
14	88,61	10 %	44,5 %	8,7 %	1,21E02	45	135
15	92,00	12,6 %	44,2 %	12,6 %	8,55E01	90	135
16	88,61	8,8 %	47,8 %	10 %	5,89E01	135	135

Результати розподілу поверхонь 3D-моделі корпусу за трьома інтервалами кутів φ_{NZ} представлено у табл. 6.16.

Таблиця 6.16 - Площа поверхонь за інтервалами φ_{NZ} для 3D-моделі корпусу

№	Висота виробу, мм	Площа поверхонь за інтервалами кутів φ_{NZ}			Мода кутів φ_{NZ}	Кут повороту навколо осі	
		1÷35	60÷120	145÷179		X	Y
1	210,02	15%	46,1 %	15,1 %	8,56E01	0	0
2	210,00	15,2 %	46,3 %	14,3 %	8,58E01	45	0
3	210,00	13,6 %	46,4 %	14,7 %	9,42E01	90	0
4	210,01	15,1 %	46,5 %	13,7 %	8,57E01	135	0
5	205,68	1,7 %	40 %	0,4 %	4,94E01	0	45
6	213,65	8,3 %	41%	7,1 %	1,21E02	45	45
7	210,00	13,6 %	46,4 %	14,7 %	9,42E01	90	45
8	213,73	7,4 %	42,4 %	8,5 %	6,3E01	135	45
9	125,06	4,7 %	77,2 %	2,9 %	9,45E01	0	90
10	205,49	2%	43,8 %	0,4 %	1,37E02	45	90
11	210,00	13,6 %	46,4 %	14,7 %	9,42E01	90	90
12	205,45	0,4 %	43,6 %	1,9 %	4,18E01	135	90
13	205,54	1,7 %	39,6 %	0,4 %	1,31E02	0	135
14	213,61	8,3 %	40,3 %	7,2 %	1,21E02	45	135
15	210,00	13,6 %	46,4 %	14,7 %	9,42E01	90	135
16	213,77	7,4 %	41,9 %	8,4 %	6,09E01	135	135

Результати розподілу поверхонь 3D-моделі шнека за трьома інтервалами кутів φ_N представлено у табл. 6.17.

Таблиця 6.17 - Площа поверхонь за інтервалами φ_{NZ} для 3D-моделі шнеку

№	Висота виробу, мм	Площа поверхонь за інтервалами кутів φ_{NZ}			Мода кутів φ_{NZ}	Кут повороту навколо осі	
		1÷35	60÷120	145÷179		X	Y
1	144,00	27,4 %	32,2 %	28%	1,58E02	0	0
2	109,59	9,5 %	39,4 %	10,1 %	1,13E02	45	0
3	40,00	4,9 %	76,8 %	5,8 %	9,45E01	90	0
4	108,31	9,1 %	41%	9,2 %	6,77E01	135	0
5	109,60	9%	39,5 %	9,4 %	1,31E02	0	45
6	85,60	6,1 %	48,6 %	6,7 %	9,75E01	45	45
7	40,00	4,9 %	76,8 %	5,8 %	9,45E01	90	45
8	84,54	6,1 %	49,2 %	6,5 %	9,64E01	135	45
9	40,00	5,7 %	76,4 %	5,6 %	9,45E01	0	90
10	40,00	5,3 %	75%	5,8 %	1,12E02	45	90
11	40,00	4,9 %	76,8 %	5,8 %	9,45E01	90	90
12	40,00	5,2 %	75%	5,8 %	1,12E02	135	90
13	110,10	9,5 %	39%	9,4 %	6,8E01	0	135
14	88,84	5,9 %	49,2 %	6,6 %	9,52E01	45	135
15	40,00	4,9 %	76,8 %	5,8 %	9,45E01	90	135
16	87,17	6,3 %	48,2 %	6,8 %	1,44E02	135	135

Результати дослідження розподілу поверхонь 3D-моделей кришки, валу та лопати за трьома інтервалами кутів між нормалями та вектором побудови φ_{NZ} для різних кутів повороту виробу φ_X і φ_Y , представлено у табл. 6.10-6.17.

Найбільш раціональні варіанти напрямку орієнтації 3D-моделей виробів виділено у відповідних таблицях. За виділених напрямків створено додаткові групи 3D-моделей. Зменшення кількості варіантів відносно загальної, дозволить скоротити час на технологічну підготовку до матеріалізації 3D-моделей виробів АМ-процесами.

6.3.4 Аналіз розподілу матеріалу 3D-моделей виробів

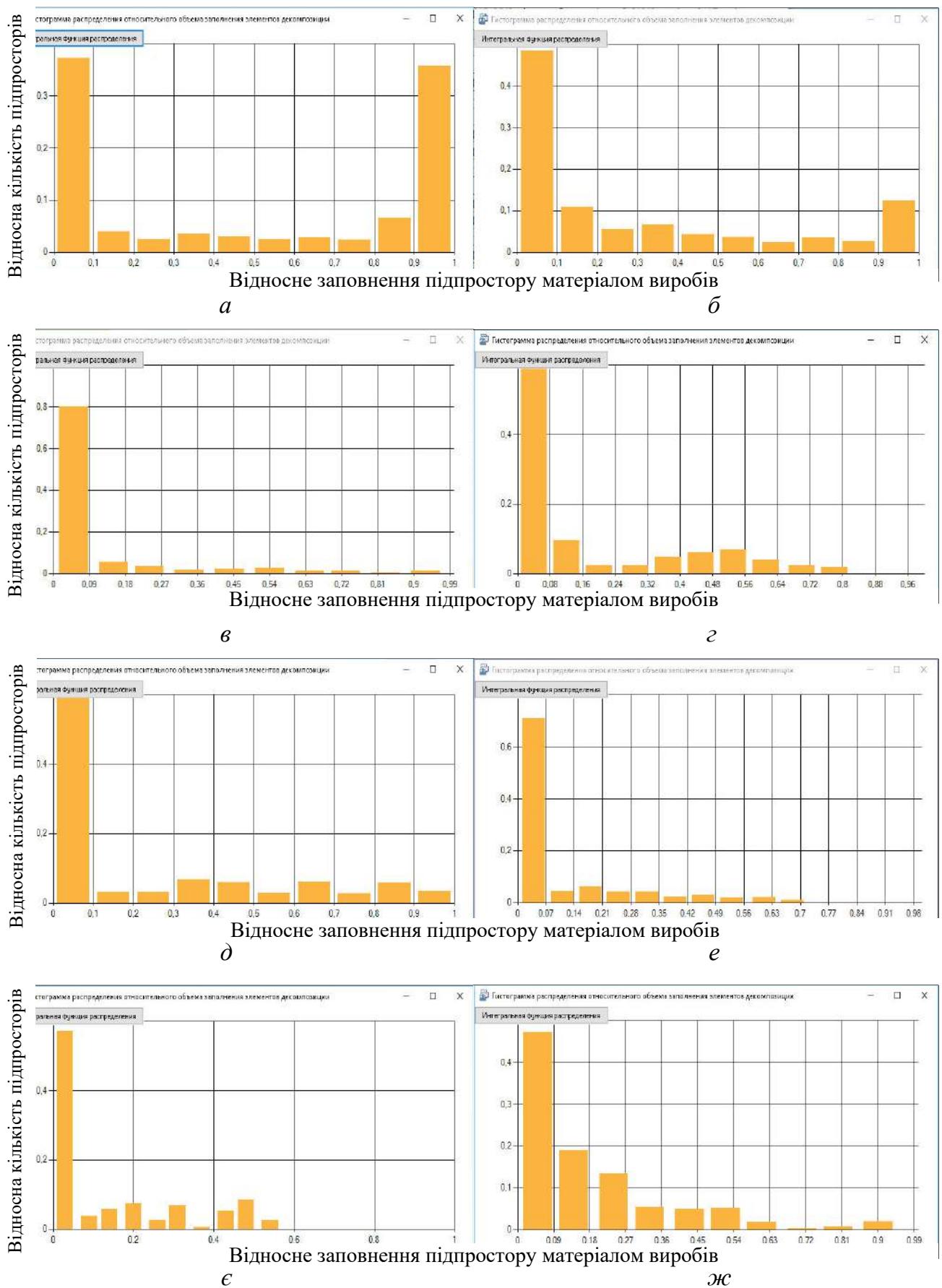
На рис. 6.33 представлено гістограми розподілу відносної наповненості матеріалом підпросторів для першого варіанту розміщення виробів. У разі моделі валу спостерігається істотно більша кількість підпросторів з мінімальним $K_{Vi} \in [0, 0,1)$ і найбільшим $K_{Vi} \in [0,9, 1]$ наповненням.

У прикладі з корпусом спостерігається більше половини підпросторів (58%) з мінімальним наповненням $K_{Vi} \in [0, 0,1)$.

Для вентилятора 46% підпросторів мають наповненість матеріалом виробу $K_{Vi} \in [0, 0,1)$. Відмінність даної 3D-моделі від валу і корпусу у досить великий кількість (32%) підпросторів з наповненням $K_{Vi} \in [0,1, 0,3)$.

Аналіз гістограм розподілу відносної наповненості вокселями матеріалу за підпросторами для тестових 3D-моделей промислових виробів дає можливість виявити деякий взаємозв'язок відносної кількості підпросторів з певною наповненістю на показник K_V .

Тому при аналізі розподілу матеріалу виробу визначалась кількість підпросторів, які не мають вокselів матеріалу N_{V0} ($P_i \in \emptyset$), не мають вокselів вільного простору N_{VI} ($F_i \in \emptyset$) і при наповненні вокселями матеріалу більше від половини об'єму підпростору $N_{V0.5}$.



a – вал; *б* – шнек; *в* – лапата; *г* – корпус; *д* – карданий вал;
е – кришка; *ж* – панель; *жс* – вентилятор

Рисунок 6.33 – Гістограми розподілу матеріалу виробів за підпросторами

6.3.5 Раціональне розміщення композиції моделей у робочому просторі установки

Для раніше отриманих варіантів декомпозиції та орієнтації виробів виконувалась задача раціонального розміщення виробів у робочому просторі АМ-установки з урахуванням критерію найбільшого відносного заповнення. Екранну форму системи з результатами аналізу представлено на рис. 6.34.

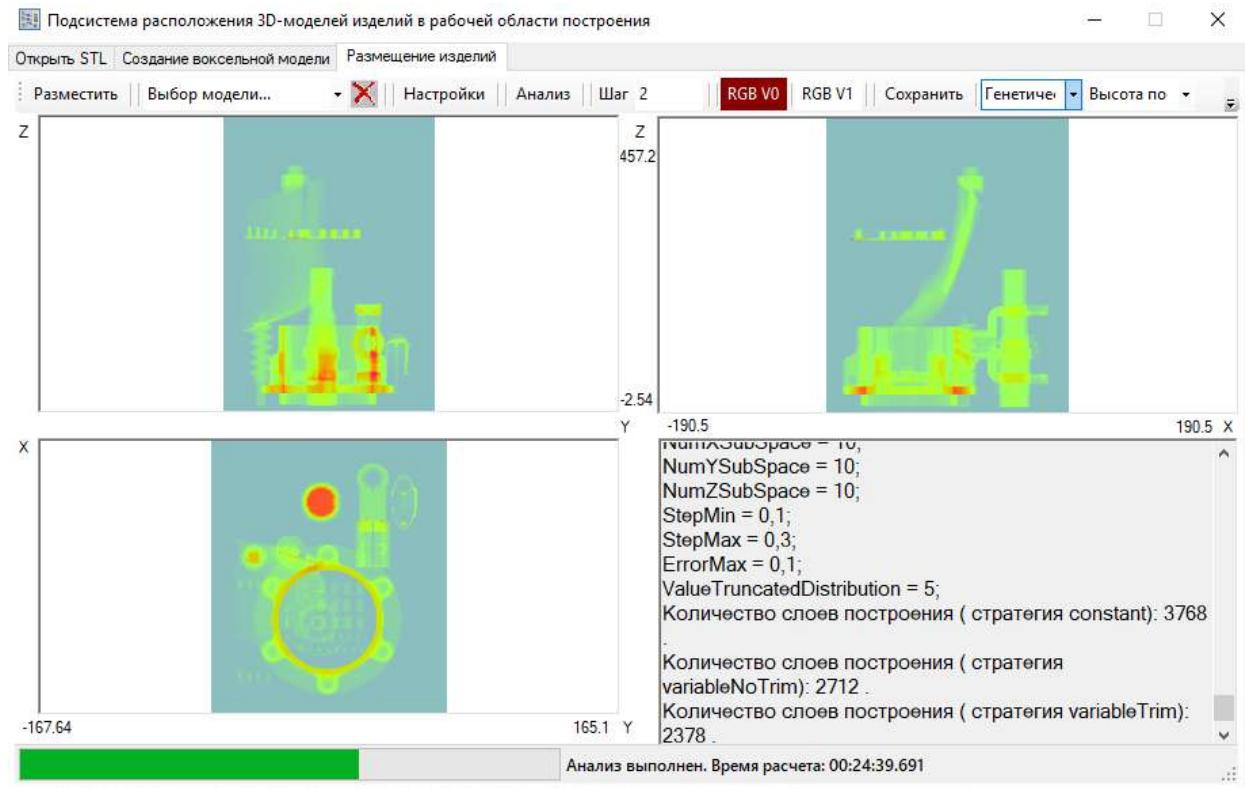


Рисунок 6.34 – Розміщення 3D-моделей у робочому просторі з використанням генетичного алгоритму

Недолік відомого способу виконання задачі щодо розташування 3D-моделей виробів у робочому просторі, розглянутого у роботі [121], в обмеженій кількості варіантів пошуку найбільш щільного розташування виробів на платформі, що необхідно для мінімізації об'єму невикористаного вихідного матеріалу або його витрати на підтримуючі структури.

У роботі запропоновано розширення можливостей застосування адитивних методів пошарової побудови виробів за рахунок збільшення варіантів вирішення оптимізаційних задач. Такий підхід дозволить зменшити обмеження за складністю одержуваних виробів і збільшити можливості для забезпечення раціонального співвідношення продуктивності та собівартості

виготовлення. Технічний результат передбачено досягти визначенням кутів повороту виробів для їхньої орієнтації та варіантів декомпозиції в процесі розміщення у робочому просторі АМ-установки з забезпеченням рівномірного просторового розподілу елементарних об'ємів матеріалу шляхом мінімізації наступної формули:

$$F = \min_{1 \leq j \leq m} \left(\sqrt{\sum_i^{k_x \cdot n_y} V_{i(x,y)}^2} \right), \quad (6.1)$$

де $V_{i(x,y)}$ – елементарний об'єм виробів в інтервалах за координатними осями X , Y в абсолютних або відносних значеннях;

m – загальна кількість варіантів розміщення виробів;

n_x, n_y – кількість інтервалів за координатними осями X і Y відповідно, $n_x = \text{const}$, $n_y = \text{const}$.

Після розміщенні 3D-моделей виробів у робочому просторі (рис. 6.34, 6.35) одержано результати аналізу, представлені у табл. 6.18 і 6.19.

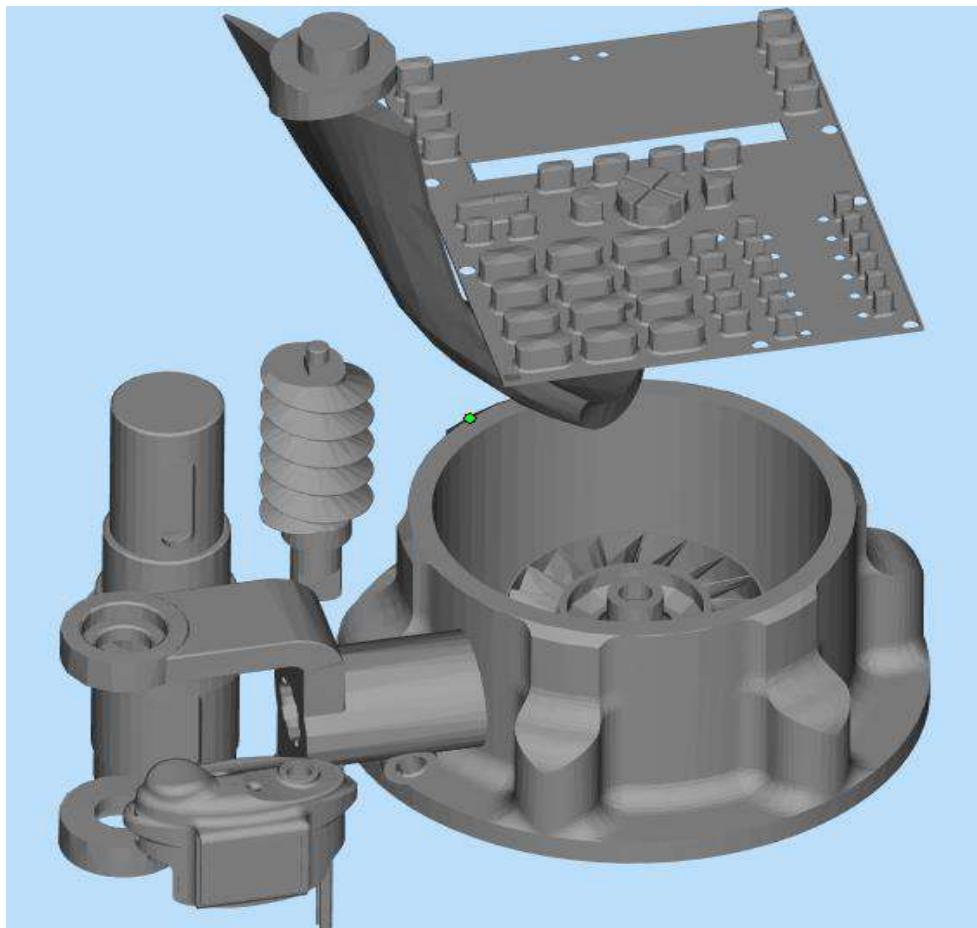


Рисунок 6.35 – Візуалізація варіанту розміщення 3D-моделей у робочому просторі

Таблиця 6.18 - Статистичні характеристики досліджених ознак використання робочого простору після розміщення з використанням генетичного алгоритму (1-й варіант) і після (2-й варіант) застосування процедури поліпшення (підвищення ефективності)

Параметри алгоритму				Висота побудови H_B , мм		Коефіцієнт використання робочого простору, K_V		Відносна кількість заповнених підпросторів			
								> 20%		< 1%	
p_c , %	p_m , %	N_p	N_g	1	2	1	2	1	2	1	2
80	1	30	50	382,46	372,46	0,0409	0,0420	0,062	0,067	0,768	0,759
80	1	30	50	387,29	382,29	0,0404	0,0410	0,060	0,063	0,778	0,770
80	1	30	50	382,81	372,69	0,0409	0,0420	0,062	0,060	0,769	0,772

Результати аналізу ефективності використання робочого простору отримано за розподілом матеріалу виробів за підпросторами. Робочий простір поділено на 10^3 підпросторів з однаковими розмірами. У вигляді гістограм представлено розподіл матеріалу за підпросторами на рис. 6.36. Більшість підпросторів (82% від загальної кількості) зайнято матеріалом менше ніж на 9%, із них 61,6% є зовсім незаповненими. Підпростори із наповненістю більше половини їхнього об'єму складають тільки 1,8% від загальної кількості.

Результати аналізів підтвердили ефективність додаткової процедури. Виконання процедури дозволило збільшити коефіцієнт використання робочого простору на 2,7% і відносну кількість заповнених підпросторів на 8,1%.

Таблиця 6.19 - Статистичні показники кількості шарів побудови після розміщення з використанням генетичного алгоритму (1-й варіант) і після (2-й варіант) застосування процедури поліпшення (підвищення ефективності)

№	Параметри алгоритму				Кількість шарів побудови					
					постійний крок		змінний крок			
	p_c , %	p_m , %	N_p	N_g	1	2	1	2	1	2
1	80	1	30	50	3768	3698	2712	2743	2378	2381
2	80	1	30	50	7536	7396	5539	5618	5539	5618
3	80	1	30	50	3797	3797	2753	2805	2389	2341
4	80	1	30	50	7593	7593	5632	5766	4889	4808
5	80	1	30	50	3787	3701	2915	2852	2383	2209
6	80	1	30	50	7573	7401	6005	5850	4900	4533

У табл. 6.19 наведено дані щодо кількості шарів побудови, необхідних для отримання виробів. Розсічення виконувалось за двома варіантами параметрів. У першому варіанті задавалися мінімальний і максимальний крок

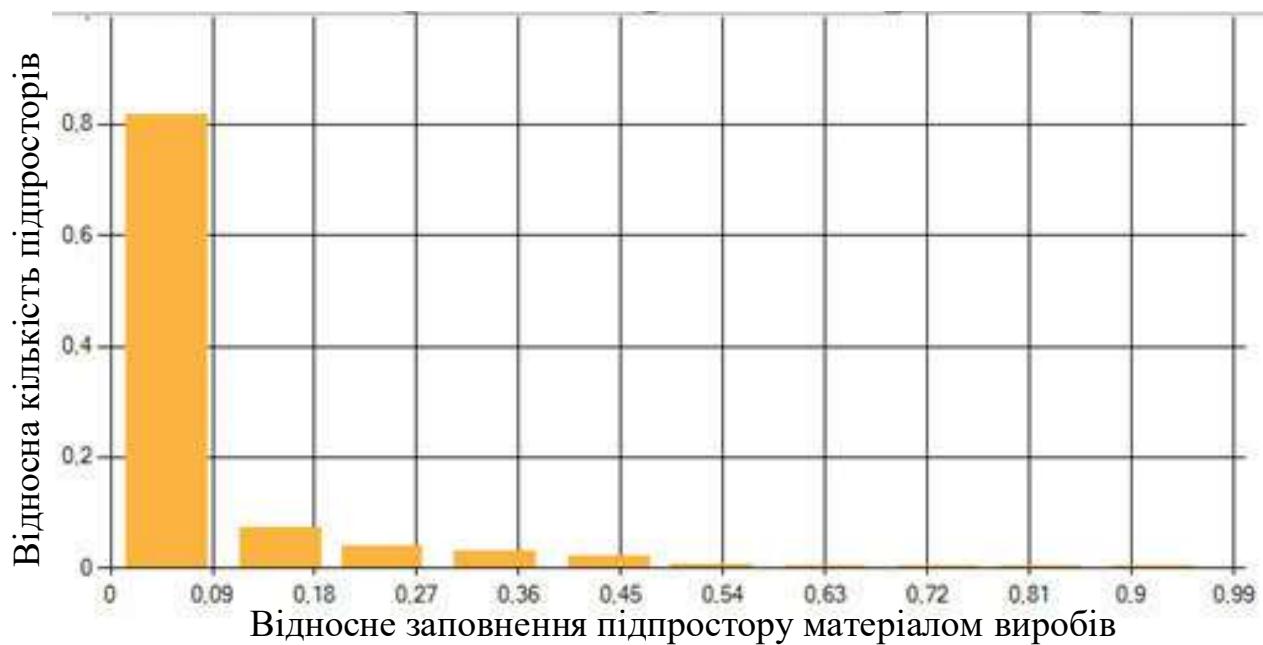


Рисунок 6.36 – Розподіл матеріалу виробів за робочими підпросторами (1-й варіант розміщення представлено на рис. 6.34)

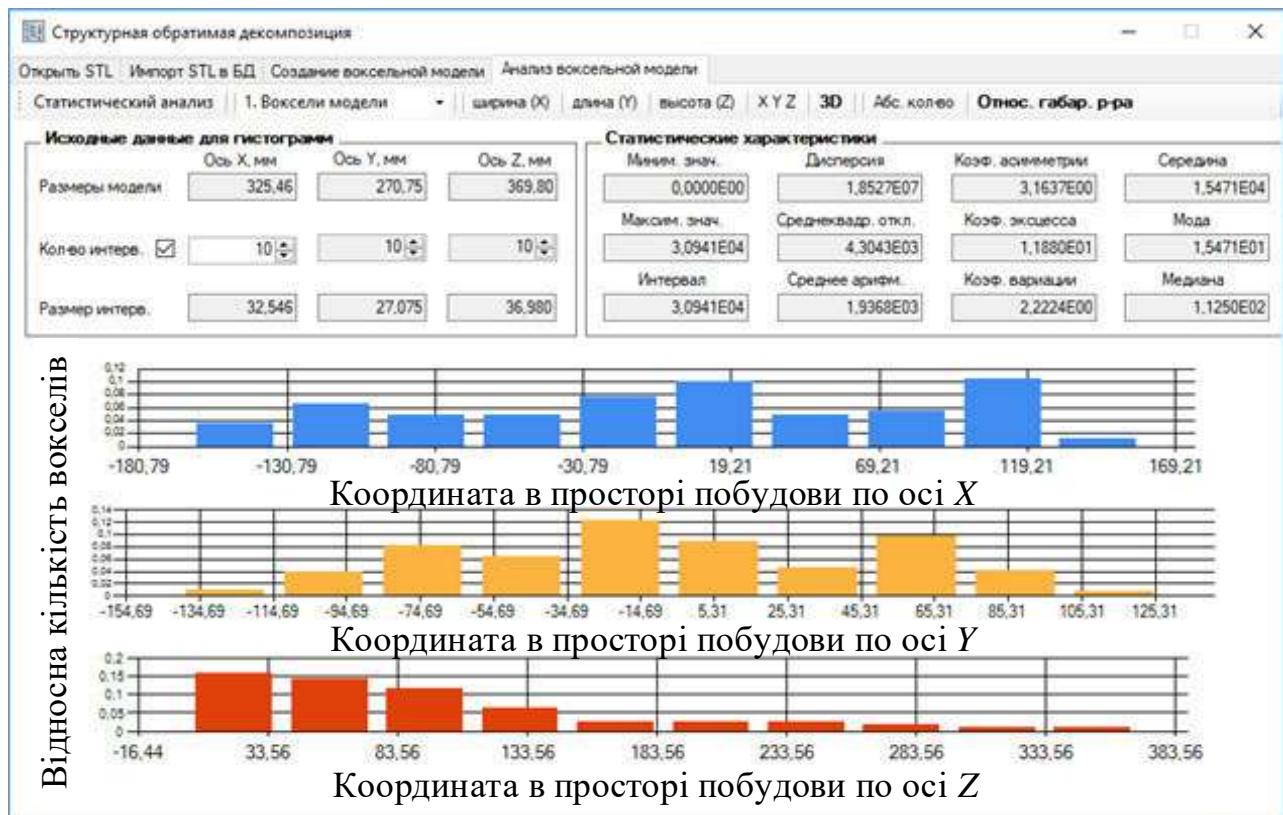


Рисунок 6.37 – Форма з результатами аналізу розподілу матеріалу виробів (варіант розміщення представлено на рис. 6.35)
у робочому просторі окремо за осями X , Y , Z

побудови $h_{min} = 0,1$ мм, $h_{max} = 0,3$ мм та найбільше граничне відхилення від правильної форми $\Delta_{Smax} = 0,1$ мм. У другому варіанті (в табл. позначено *) - $h_{min} = 0,05$ мм, $h_{max} = 0,15$ мм і $\Delta_{Smax} = 0,05$ мм.

Створено варіант розміщення моделей (рис. 6.35), взятий за базовий, для подальшого порівняння ефективності використання структурної зворотної декомпозиції та стратегії пошарової побудови з перемінним кроком.

6.3.6 Розміщення композиції 3D-моделей виробів після їх декомпозиції у робочому просторі установки

Перший варіант розміщення виконано з декомпозицією лопатки, як виробу з найбільшою висотою побудови. Як показано на рис. 6.38, лопатку поділено на дві рівні частини за габаритним розміром по координаті Z. Результати аналізу характеристик робочого простору з розміщеними виробами, представлено у табл. 6.20 і 6.21.

Таблиця 6.20 - Статистичні характеристики досліджених ознак використання робочого простору після розміщення з використанням генетичного алгоритму (1-й варіант) та після (2-й варіант) застосування процедури підвищення ефективності

Параметри алгоритму				Висота побудови H_B , мм		Коефіцієнт використання роб. простору K_v		Відносна кількість під- просторів заповнених			
								> 20%		< 1%	
p_c , %	p_m , %	N_p	N_g	1	2	1	2	1	2	1	2
80	1	30	50	300,52	285,52	0,0531	0,0559	0,059	0,051	0,719	0,707
80	1	30	50	297,22	247,22	0,0537	0,0646	0,055	0,048	0,731	0,702
80	1	30	50	307,87	282,87	0,0518	0,0564	0,050	0,056	0,724	0,731

Таблиця 6.21 - Статистичні показники кількості шарів побудови, після розміщення з використанням генетичного алгоритму (1-й варіант) та після (2-й варіант) застосування процедури підвищення ефективності

№	Параметри алгоритму				Кількість шарів побудови					
					постійний крок		змінний крок			
	p_c , %	p_m , %	N_p	N_g	1	2	1	2	1	2
1	80	1	30	50	2859	2826	2300	2260	1868	1796
2*	80	1	30	50	5718	5652	4741	4659	4741	4659
3	80	1	30	50	2852	2460	2273	2078	2273	1519
4*	80	1	30	50	5704	4920	4657	4255	3795	2125
5	80	1	30	50	2979	2799	2269	2292	1845	1657
6*	80	1	30	50	5957	5599	4678	4682	3806	3415

Примітка * - Завдання параметрів $h_{min} = 0,05$ мм, $h_{max} = 0,15$ мм і $\Delta_{Smax} = 0,05$ мм.

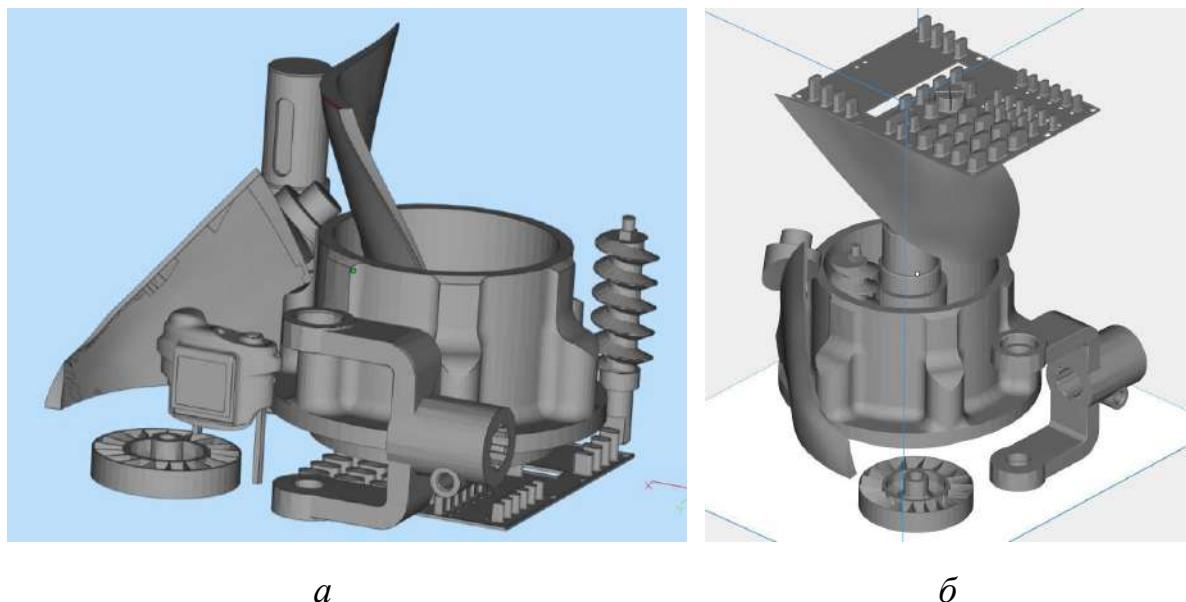


Рисунок 6.38 – Два варіанти (2-й і 3-й) розміщення 3D-моделей у робочому просторі з декомпозицією лопатки

Створено три варіанти розміщення 3D-моделей з однаковими параметрами генетичного алгоритму. За всіма характеристиками найбільш раціональним є другий варіант розміщення, представлений на рис. 6.38. Даний варіант обрано для виконання подальшого порівняння з базовим варіантом, представленим на рис. 6.35, щодо ефективності використання структурної зворотної декомпозиції та стратегії пошарової побудови з перемінним кроком. Результати розподілу матеріалу для вибраного варіанту представлено на рис. 6.39 та 6.40.

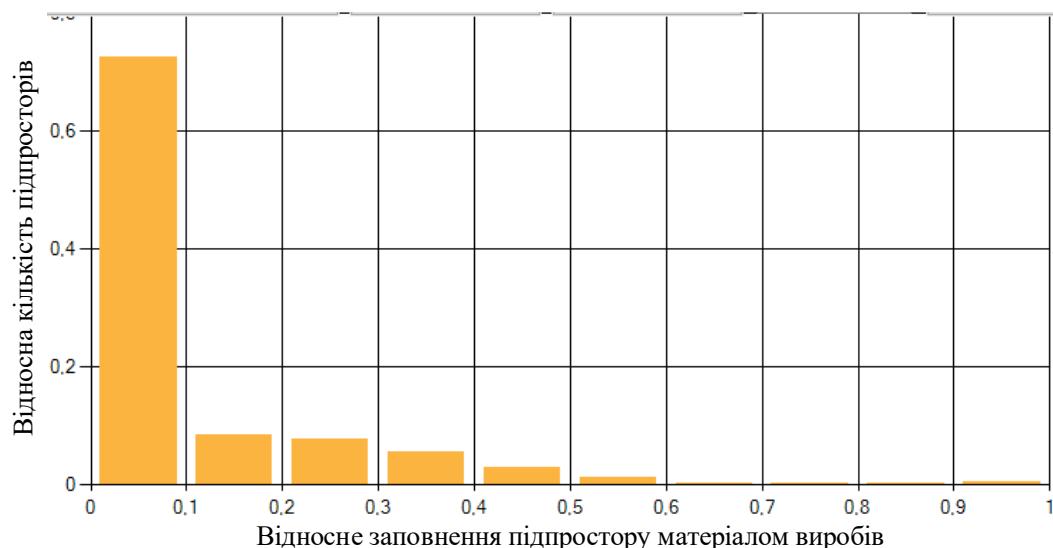


Рисунок 6.39 – Розподіл матеріалу виробів за робочими підпросторами (другий варіант розміщення представлено на рис. 6.38)



Рисунок 6.40 – Форма з результатами аналізу другого варіанту розподілу матеріалу виробів (рис. 6.38) у робочому просторі окремо за осями X , Y , Z

У даному випадку модель композиції виробів (висота побудови 247,22 мм, наповненість – 6,46 %, із 1000 підпросторів, пустих – 552, наповнених більше 20% від об'єму - 48) було розсічено 4 255 шарами при змінній стратегії побудови ($h_{\min} = 0,05$ мм, $h_{\max} = 0,15$ мм, $\Delta S_{\max} = 0,05$ мм) та 2 125 шарами при усіченні розподілу кутів ϕ_{NZ} за їх площею на 5%.

В наслідок визначення раціональної орієнтацією 3D-моделі валу за критерієм мінімізації відхилень від правильної форми поверхонь, найбільший розмір виробу становиться по осі Z . Тому наступні варіанти розміщення виконано з декомпозицією валу, як виробу з найбільшою висотою побудови. Вал було поділено на дві рівні частини по координаті Z , а також добавлено варіанти з іншими альтернативами раціональної орієнтації 3D-моделі пластини.

Результати аналізу робочого простору з виробами представлено у табл. 6.22 і 6.23.

Таблиця 6.22 - Статистичні характеристики досліджених ознак використання робочого простору після розміщення з використанням генетичного алгоритму (1-й варіант) та після (2-й варіант) застосування процедури підвищення ефективності

Параметри алгоритму				Висота побудови H_B , мм		Коефіцієнт використання роб. простору K_V		Відносна кількість заповнених підпросторів			
								> 20%		< 1%	
p_c , %	p_m , %	N_p	N_g	1	2	1	2	1	2	1	2
80	1	30	50	259,26	255,59	0,0616	0,0624	0,048	0,044	0,716	0,711
80	1	30	50	265,03	240,03	0,0602	0,0665	0,056	0,046	0,705	0,686
80	1	30	50	284,89	264,89	0,0560	0,0602	0,048	0,047	0,727	0,731
80	1	30	50	345,87	249,87	0,0461	0,0639	0,063	0,045	0,749	0,680

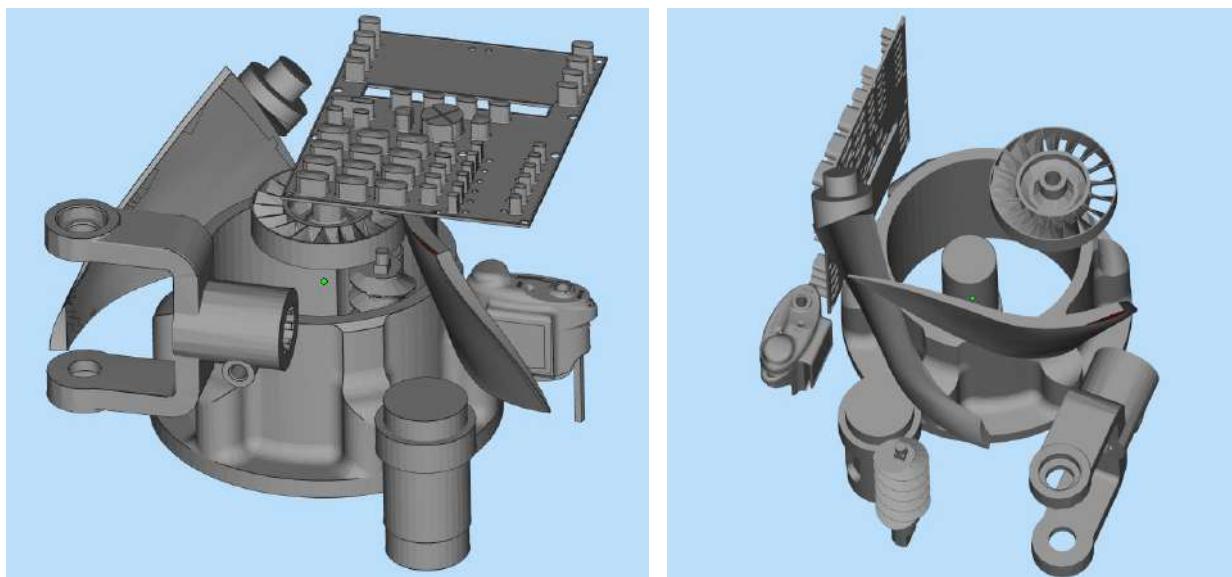
Таблиця 6.23 - Статистичні показники кількості шарів побудови після розміщення з використанням генетичного алгоритму (1-й варіант) та після (2-й варіант) застосування процедури підвищення ефективності

№	Параметри алгоритму				Кількість шарів побудови							
					постійний крок		zmінний крок		$\Delta\varphi_{NZ} = 0 \%$		$\Delta\varphi_{NZ} = 5 \%$	
	p_c , %	p_m , %	N_p	N_g	1	2	1	2	1	2	1	2
1	80	1	30	50	2544	2526	2086	2069	1558	1570		
2*	80	1	30	50	5087	5052	4391	4257	3498	3215		
3	80	1	30	50	2602	2371	1990	1936	1579	1936		
4*	80	1	30	50	5204	4742	4083	3975	3246	3975		
5 ¹	80	1	30	50	2825	2734	2301	2326	1921	1847		
6* ¹	80	1	30	50	5650	5467	4742	4785	4742	3794		
7 ¹	80	1	30	50	3457	2584	2797	2194	2224	1736		
8* ¹	80	1	30	50	6913	5166	5753	4527	4617	3583		

Примітка. * - Завдання параметрів $h_{min} = 0,05$ мм, $h_{max} = 0,15$ мм и $\Delta S_{max} = 0,05$ мм.

¹ – альтернативна орієнтація пластини з поворотом навколо осі X на 90°.

У деяких варіантах розміщення 3D-моделей ефективність від реалізації стратегії зі змінним кроком при усіченні розподілу кутів φ_{NZ} не проявляється, що пояснюється недостатнім використанням робочого простору через малу кількість виробів, розміщених у робочому просторі. В результаті в окремих шарах не спостерігається достатньої різноманітності величин φ_{NZ} , і тому щільність розподілу кутів φ_{NZ} на граничних значеннях завищена для виконання його усічення на малу величину $\Delta\varphi_{NZ} = 5\%$. Особливо це проявляється при завищених вимогах до точності побудови, тобто при малому кроці побудови для варіантів з найбільшим коефіцієнтом використання робочого простору.



a

б

Рисунок 6.41 – Варіант розміщення моделей у робочому просторі з декомпозицією лопатки та валу

Створений другий варіант розміщення моделей (рис. 6.41 а) обрано для подальшого порівняння з варіантом, представленим на рис. 6.38, щодо ефективності використання структурної зворотної декомпозиції та стратегії пошарової побудови з перемінним кроком.

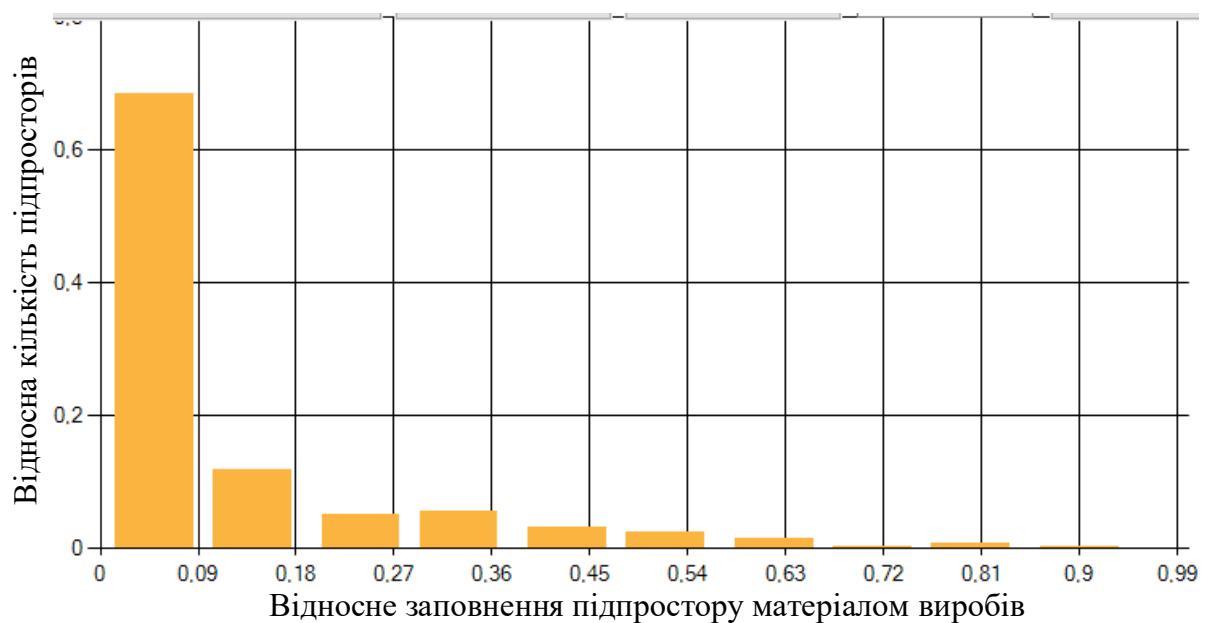


Рисунок 6.42 – Розподіл матеріалу виробів за робочими підпросторами (другий варіант розміщення представлений на рис. 6.41 а)

У даному випадку раціональній варіант 3D-моделі композиції виробів (висота побудови - 240,03 мм, наповненість – 6,65%, із 1000 підпросторів,

порожніх – 454, наповнених більше 20% від об'єму - 46) розсічений 1936 шарами при змінній стратегії побудови ($h_{\min} = 0,1$ мм, $h_{\max} = 0,3$ мм, $\Delta s_{\max} = 0,1$ мм). При усіченні розподілу кутів ϕ_{NZ} за площею поверхні на 5% також 3D-моделі розсічено – 1936 шарами.

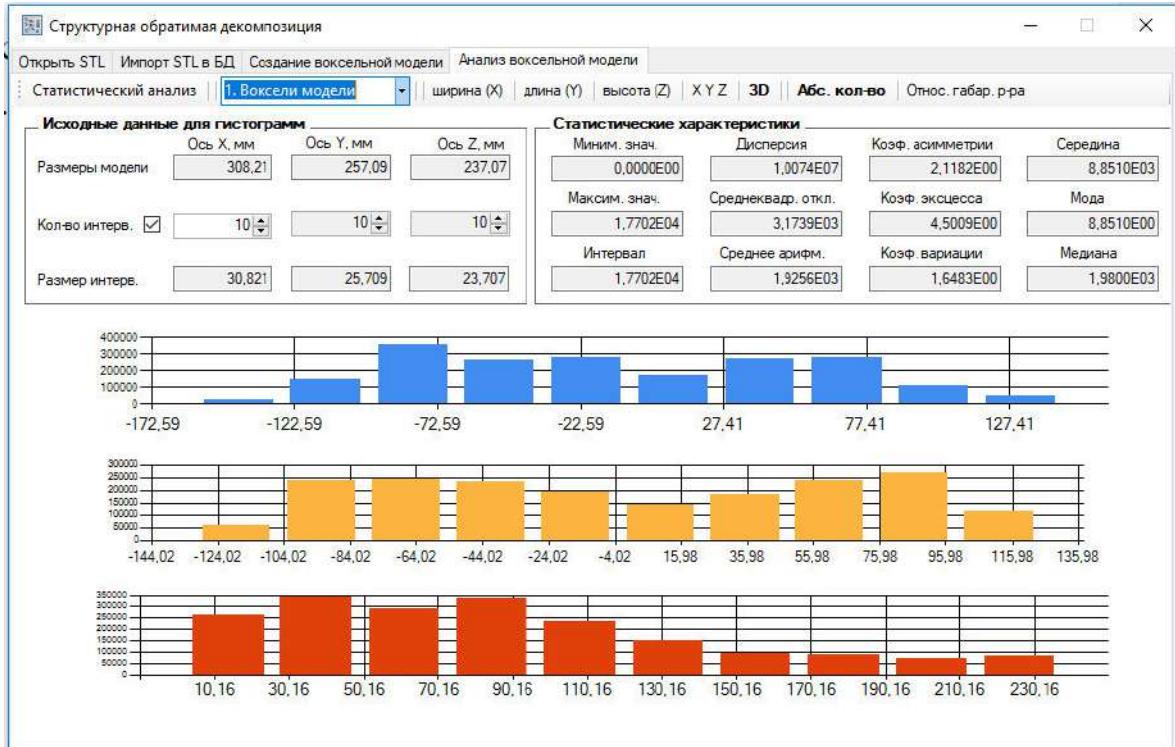


Рисунок 6.43 – Форма з результатами аналізу розподілу матеріалу виробів (рис. 6.41 а) у робочому просторі окремо за осями X , Y , Z

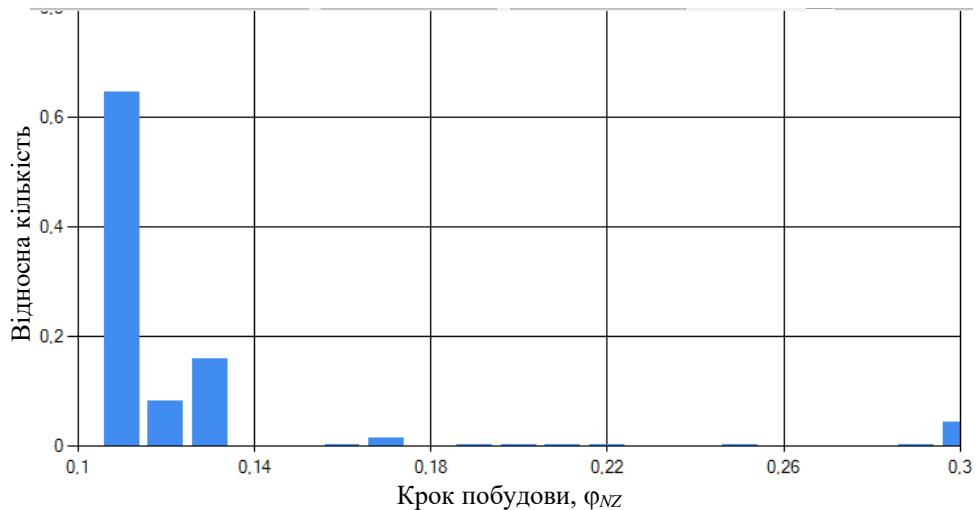


Рисунок 6.44 – Щільність розподілу кроku при $h_{\min} = 0,1$ мм, $h_{\max} = 0,3$ мм, $\Delta s_{\max} = 0,1$ мм, $\Delta \phi_{ZN} = 5\%$ (варіант розміщення на рис. 6.41 а)

Цей варіант розміщення 3D-моделей є достатньо привабливим, тому для нього виконано пошаровий аналіз за такими основними характеристиками:

крок побудови (на рис. 6.44, 6.45) та площа шарів (рис. 6.46).

Статистичний аналіз розподілу кроку побудови показує наступні значення квартилей: 0 - 0,10; 1 - 0,10; 2 - 0,11; 3 - 0,13; 4 - 0,30. Основні статистичні характеристики: середньоквадратичне відхилення $\sigma\{h_i\} = 0,0425$ мм, середнє арифметичне значення $\bar{h}_i = 0,1220$ мм.

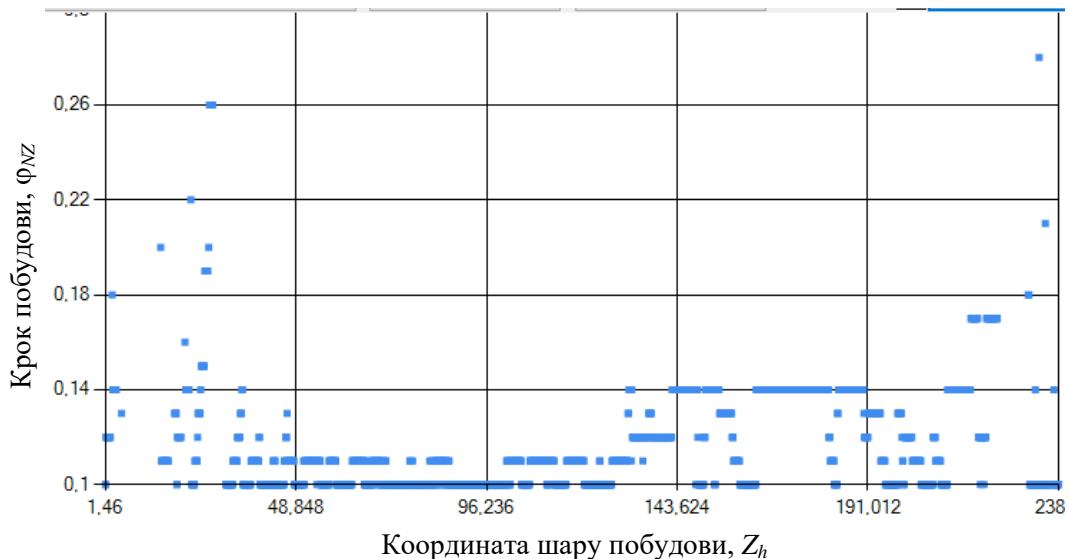
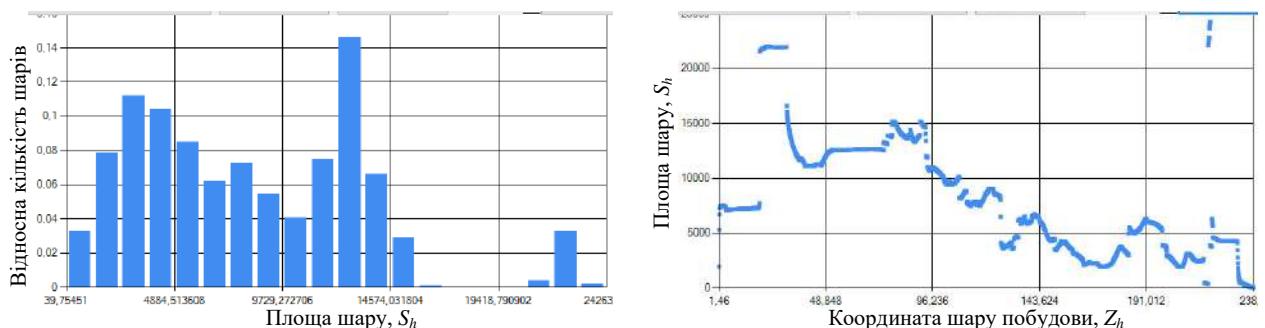


Рисунок 6.45 – Залежність кроку від координати побудови шару по осі Z
(варіант розміщення на рис. 6.41 а)

Площа шарів розсічень є однією із найважливіших характеристик для оцінки наповненості робочого простору та рівномірності температурних полів для забезпечення рівномірної усадки матеріалу і, відповідно, зменшення відхилення від правильної форми поверхонь. На рис. 6.46 представлено щільність та залежність площі шарів від їх координати по осі Z .



Значення квартілей: 0 - 39,8; 1 - 3857,3; 2 - 7657,4; 3 - 12574,9; 4 - 24263,6

Рисунок 6.46 – Щільність розподілу та залежність площі розсічень від координати побудови шару по осі Z (варіант розміщення на рис. 6.41 а)

Наступний варіант розміщення (рис. 6.47) виконано з декомпозицією карданного валу, як виробу з найбільшою висотою побудови. Карданий вал був поділений на три частини враховуючи раціональну орієнтацію по окремо.

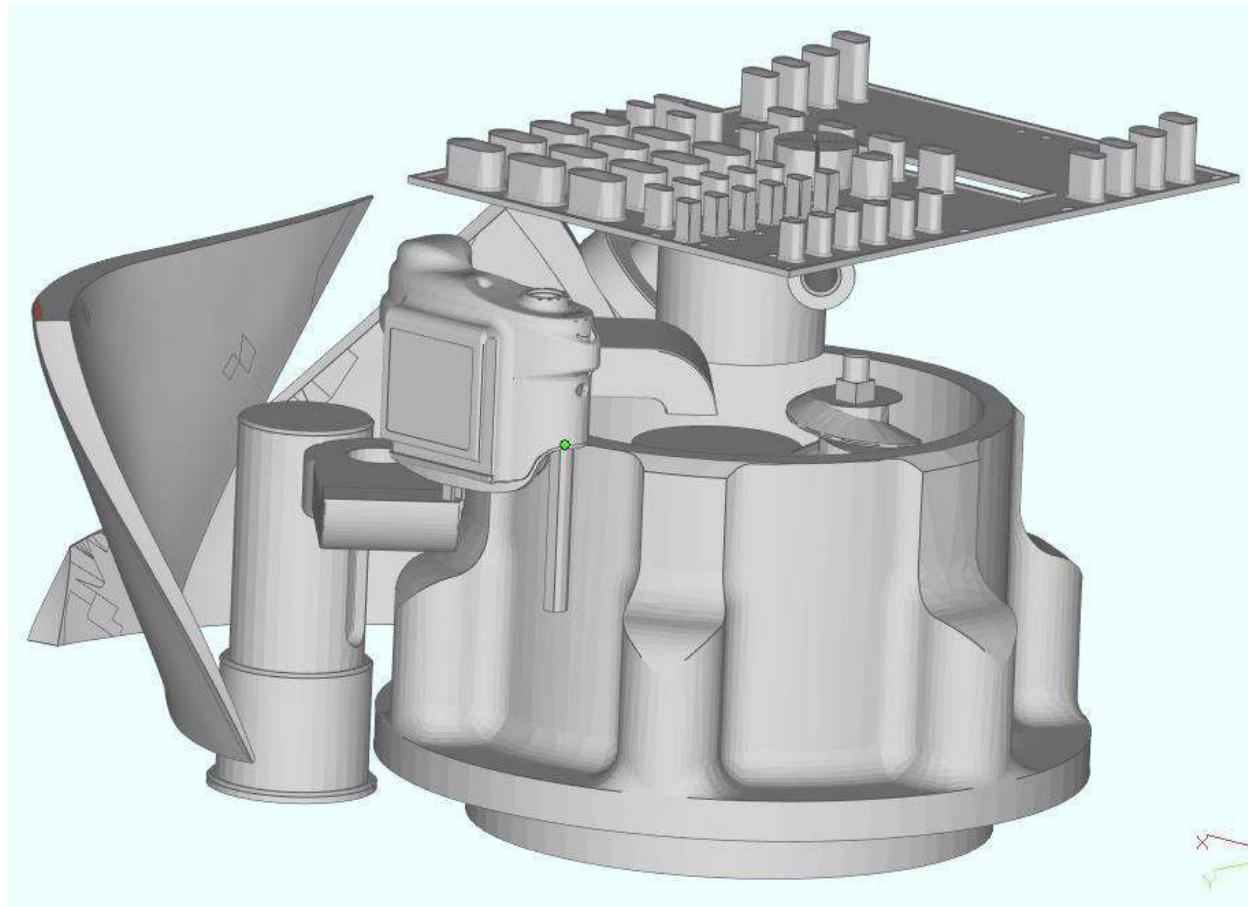


Рисунок 6.47 – Варіант розміщення 3D-моделей у робочому просторі з декомпозицією лопатки, валу та карданного валу

Результати аналізу робочого простору з виробами представлено у табл. 6.24 і 6.25.

Таблиця 6.24 - Статистичні характеристики досліджених ознак використання робочого простору після розміщення (1-й варіант) з використанням генетичного алгоритму та після (2-й варіант) застосування процедури підвищення ефективності

Параметри алгоритму				Висота побудови H_B , мм		Коефіцієнт використання робочого простору, K_V		Відносна кількість наповнених підпросторів			
p_c , %	p_m , %	N_p	N_g	1	2	1	2	> 20%	< 1%	1	2
80	1	30	50	257,79	232,79	0,062	0,0686	0,042	0,032	0,688	0,686
80	1	30	50	239,67	219,67	0,0666	0,0727	0,048	0,045	0,692	0,681
80	1	30	50	223,85	213,85	0,0713	0,0747	0,042	0,040	0,665	0,672
80	1	30	50	279,73	269,73	0,0571	0,0592	0,046	0,048	0,700	0,713

Таблиця 6.25 - Статистичні характеристики кількості шарів побудови після розміщення (1-й варіант) з використанням генетичного алгоритму та після (2-й варіант) застосування процедури підвищення ефективності

№	Параметри алгоритму				Кількість шарів побудови			
					постійний крок		змінний крок	
	$p_c, \%$	$p_m, \%$	N_p	N_g	1	2	1	2
1	80	1	30	50	2481	2310	1917	1881
2*	80	1	30	50	4961	4620	3941	3854
3	80	1	30	50	2366	2167	1921	1834
4*	80	1	30	50	4732	4334	3972	3792
5 ¹	80	1	30	50	2211	2144	1903	1880
6* ¹	80	1	30	50	4421	4287	3920	3881
7 ¹	80	1	30	50	2721	2703	2345	2369
8* ¹	80	1	30	50	5442	5406	4856	4919

Примітка: * - розсічення з параметрами $h_{min} = 0,05$ мм, $h_{max} = 0,15$ мм і $\Delta S_{max} = 0,05$ мм.

¹ – альтернативна орієнтація пластиини з поворотом навколо осі X на 90°.

Порівняльний аналіз досліджених показників між варіантами розміщення отриманих з використанням генетичного алгоритму, дозволив виявити наступне:

- відмінності за висотою пошарової побудови виробів після використання генетичного алгоритму – 20% та після застосування процедури підвищення ефективності – 20,7%;

- відносна кількість заповнених підпросторів після використання генетичного алгоритму – 0,042÷0,048 та після застосування процедури підвищення ефективності – 0,032÷0,048;

- відносна кількість незаповнених підпросторів після використання генетичного алгоритму – 0,665÷0,700 та після застосування процедури підвищення ефективності – 0,672÷0,713;

- зменшення кількості шарів при використанні стратегії зі змінним кроком пошарової побудови ($\Delta \phi_{NZ} = 0\%$) становить після використання генетичного алгоритму – 10,8÷22,7%, а після застосування процедури підвищення ефективності – 9,0÷18,6%;

- зменшення кількості шарів, використовуючи адаптивну стратегію зі змінним кроком побудови при $\Delta \phi_{NZ} = 5\%$, після використання генетичного алгоритму становить – 10,8÷39,7% та після застосування процедури

підвищення ефективності – 9,0÷36,5%;

- вплив параметру $\Delta\phi_{NZ}$ стратегії пошарового розсічення на кількість шарів є істотним для варіантів розміщення, де найбільш ефективно реалізується стратегія зі змінним кроком при $\Delta\phi_{NZ} = 0$;

- ефективність від застосування стратегії зі змінним кроком побудови тим вище, чим краще показники розміщення за наповнюваністю підпросторів матеріалом (забезпечення показників близького до рівномірного розподілу) і менше висота побудови виробів.

Застосування процедури підвищення ефективності призводить до зміни показників наповненості робочого простору. Дані показники демонструють тенденцію до рівномірного розподілу матеріалу за робочим простором установки. Дане спостереження також підтверджується отриманими гістограмами розподілу матеріалу виробів (приклад такого розподілу представлено на рис. 6.48).

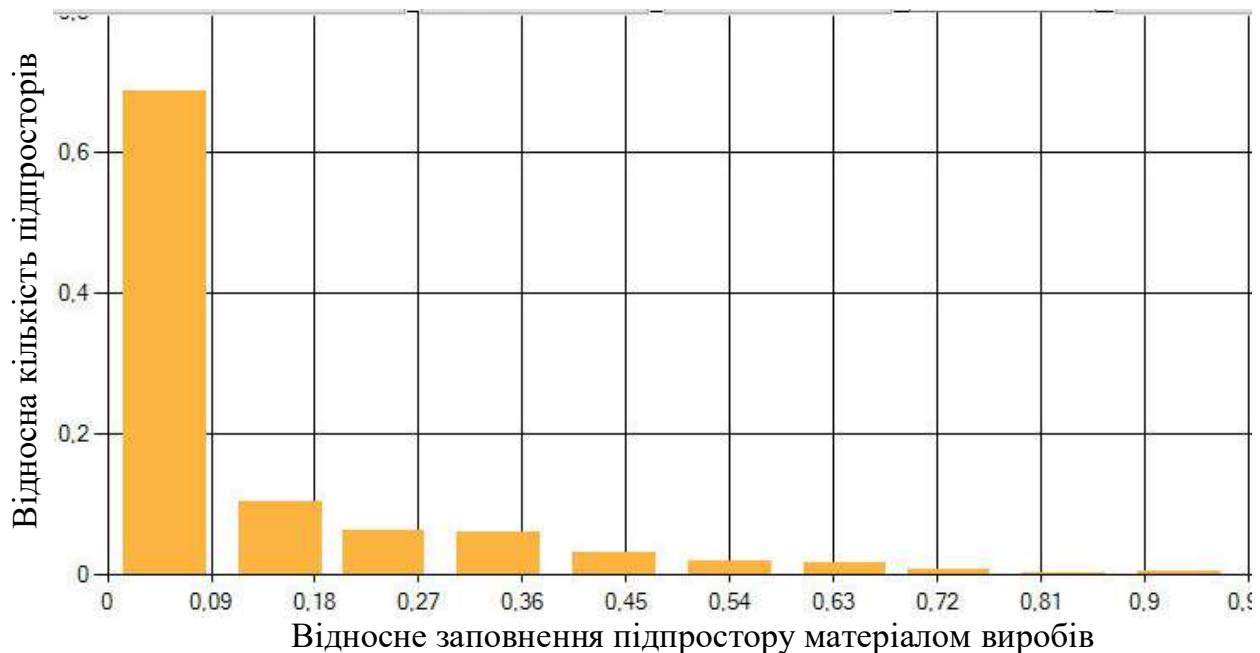


Рисунок 6.48 – Розподіл матеріалу виробів за робочими підпросторами
(другий варіант розміщення представлено на рис. 6.47)

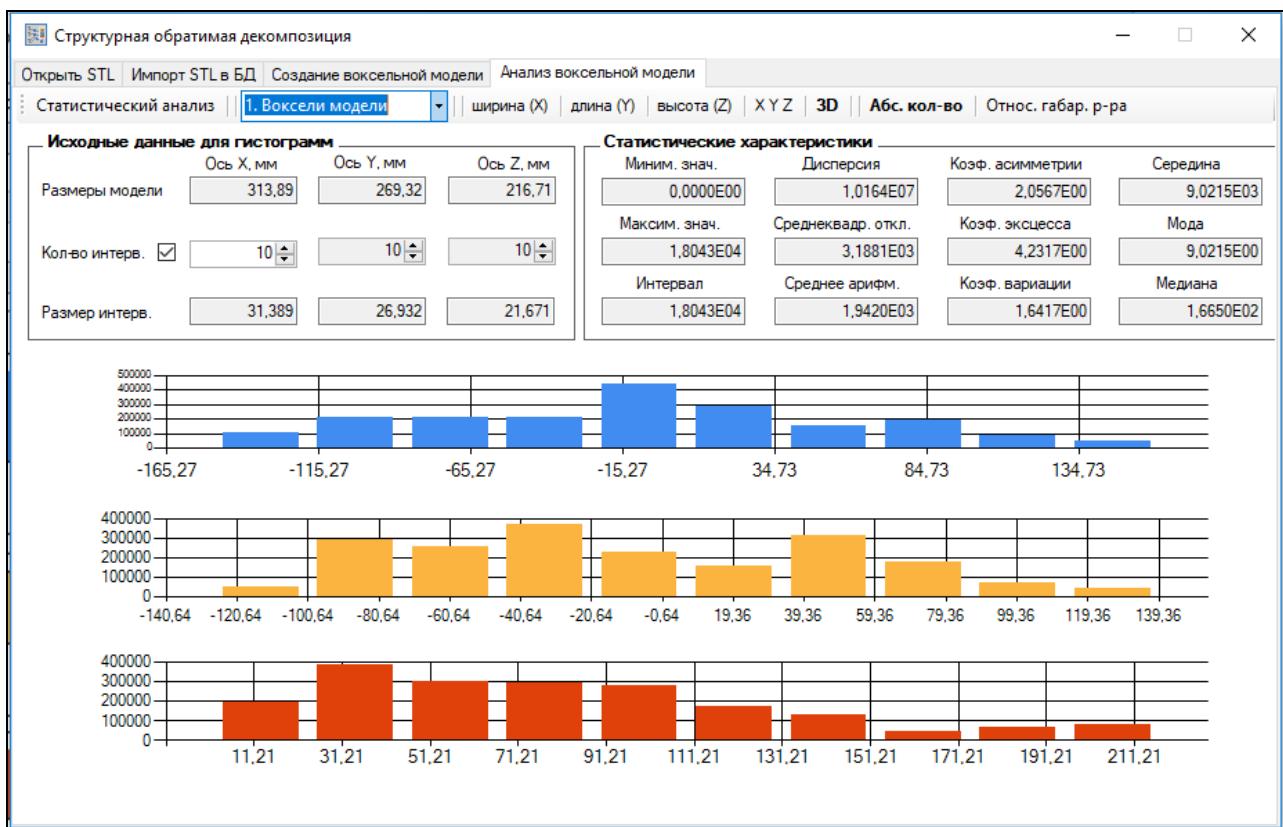


Рисунок 6.49 – Форма з результатами аналізу розподілу матеріалу виробів (рис. 6.47) у робочому просторі окремо за осями X , Y , Z

З розглянутих 4-х варіантів (табл. 6.24) розміщення 3D-моделей найбільш раціональними є 2-й і 3-й варіант в залежності від вимог до точності виготовлення. При занижених вимогах до точності побудови, найкращим є 2-й варіант (табл. 6.24) тому, що він забезпечує матеріалізацію за мінімальної кількості шарів $n_l = 1377$ (3-й варіант в табл. 6.25) за умови, що $\Delta_{Smax} = 0,1$ мм. При завищених вимогах до точності побудови, найкращим є 3-й варіант (табл. 6.24), тому що він забезпечує матеріалізацію з мінімальною кількістю шарів $n_l = 2951$ (6-й варіант в табл. 6.25) за умови, що $\Delta_{Smax} = 0,05$ мм.

У 3-му варіанті розміщення (табл. 6.24) 3D-модель композиції виробів (висота побудови 213,85 мм, наповненість робочих підпросторів - 7,47%) була розсічена 3881 шарами при змінній стратегії побудови ($h_{min} = 0,1$ мм, $h_{max} = 0,3$ мм, $\Delta_{Smax} = 0,1$ мм). При усіченні розподілу кутів нахилу граней відносно вектору побудови за їх площею на 5% - 2951 шарів.

Науково-обґрутовано можливо вивчити варіант розміщення виробів у робочому просторі за обраною стратегією розсічення на основі статистичного

аналізу розподілу кроку побудови h_i та площі розсічень S_i . Відповідні приклади порівняльного аналізу гістограм розподілу h_i та S_i показано на рис. 6.50, 6.51.

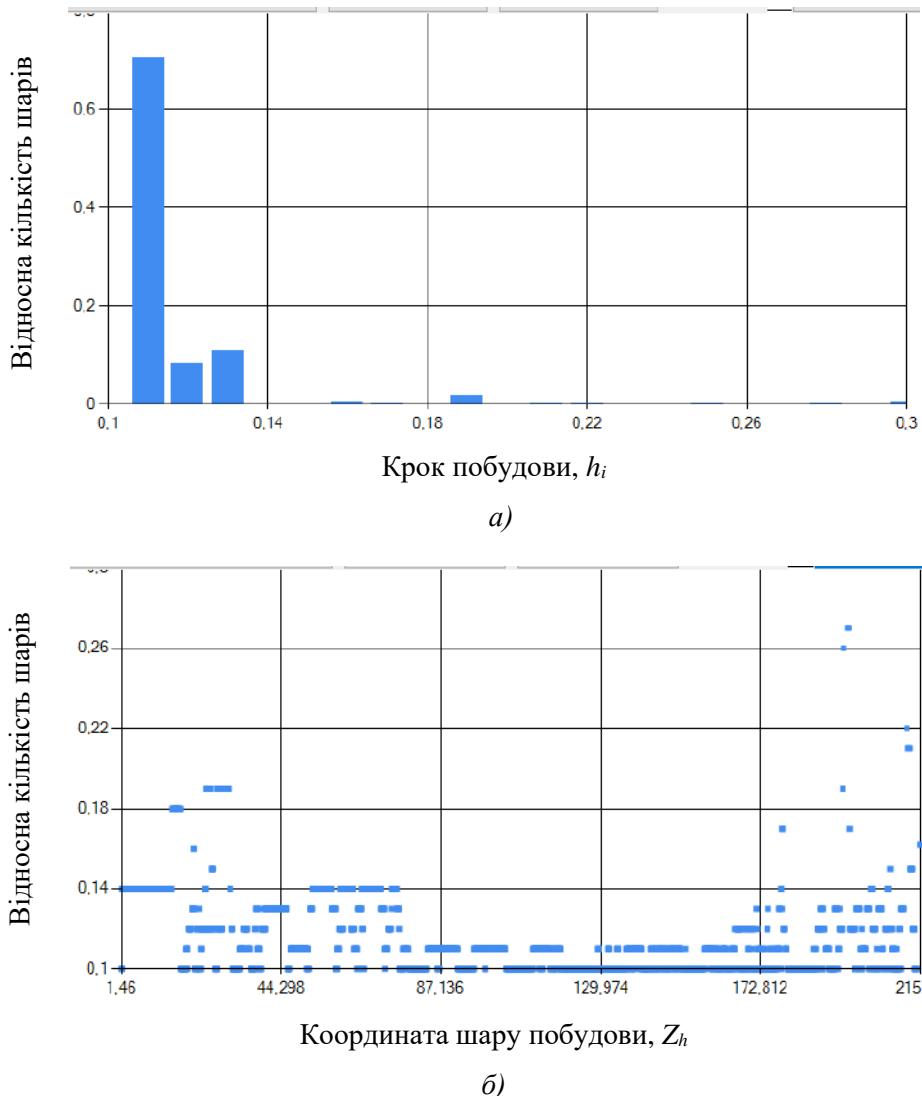


Рисунок 6.50 – Щільність розподілу (a) та залежність кроку від координати побудови шару по осі Z (б) при визначенні кроку з параметрами $h_{min} = 0,1$ мм, $h_{max} = 0,3$ мм,

$$\Delta S_{max} = 0,1 \text{ мм}, \Delta \varphi_{NZ} = 0\%$$

Визначено розподіл відхилень від правильної форми поверхонь (рис. 6.52, 6.53) для визначення ефективності пошарової побудови (найбільшої продуктивності виготовлення) виробів.

Додаткове виконання декомпозиції виробів є нерациональним тому, що для подальшого збільшення коефіцієнту заповнення робочого простору необхідно розділити наступні вироби: лопатку (кожну частину), корпус (на 4 частини) та панель (на 4 частини). Така додаткова кількість частин суттєво

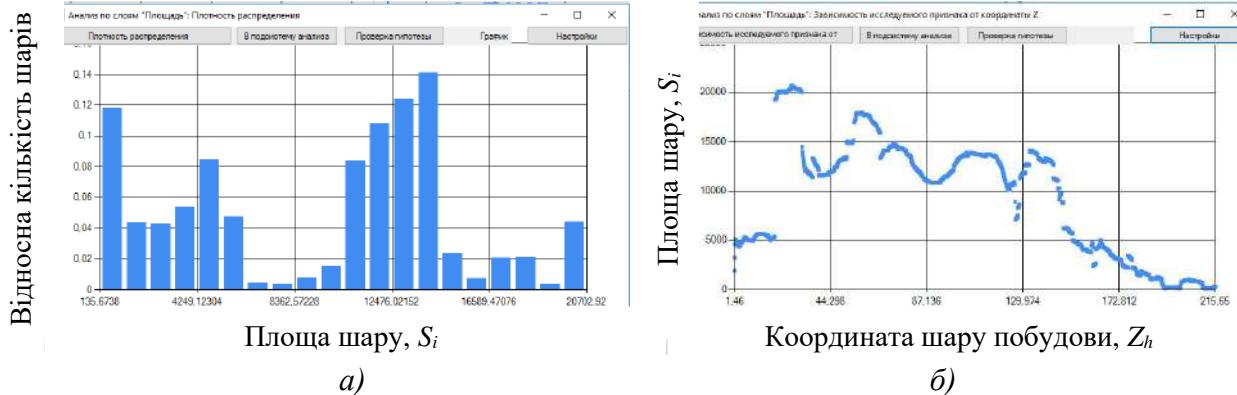


Рисунок 6.51 – Щільність розподілу (а) та залежність площині шарів від координати побудови по осі Z (б) при процедурі визначення кроку за параметрами
 $h_{min} = 0,1$ мм, $h_{max} = 0,3$ мм, $\Delta S_{max} = 0,1$ мм, $\Delta \varphi_{NZ} = 0\%$

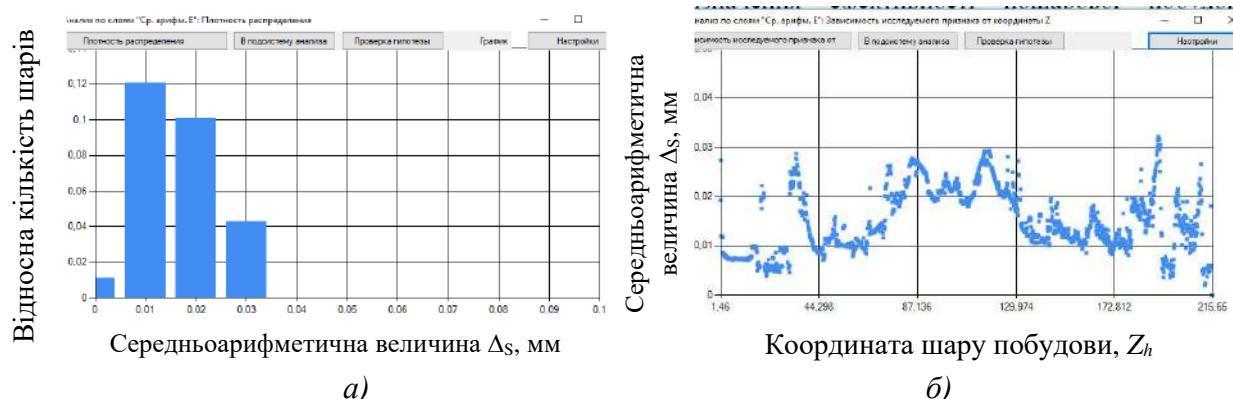


Рисунок 6.52 – Щільність розподілу (а) та залежність середньоарифметичної величини відхилення від правильної форми від координати пошарової побудови по осі Z (б) при визначенні змінного кроку за параметрами $h_{min} = 0,1$ мм, $h_{max} = 0,3$ мм, $\Delta S_{max} = 0,1$ мм, $\Delta \varphi_{NZ} = 0\%$

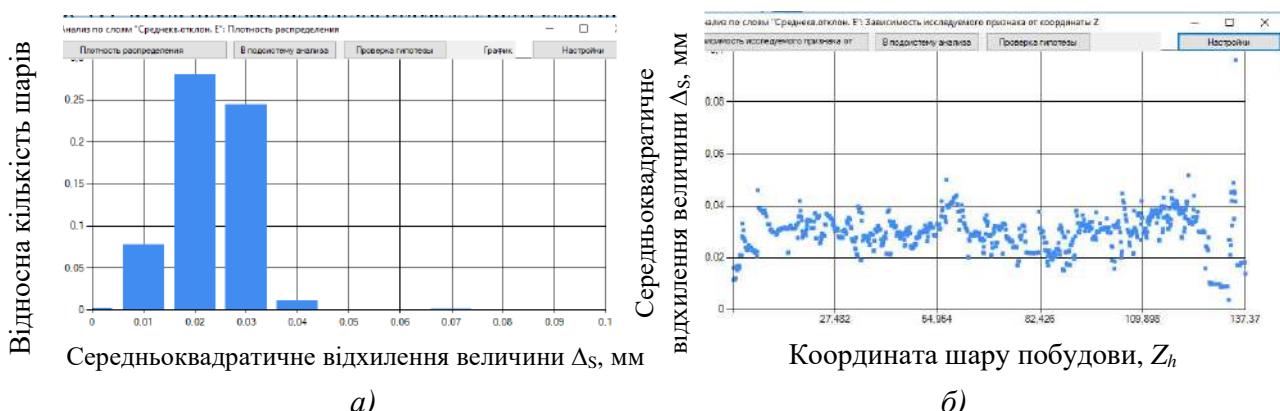


Рисунок 6.53 – Щільність розподілу (а) та залежність середньоквадратичного відхилення величини відхилення від правильної форми від координати пошарової побудови по осі Z (б) при процедурі визначення змінного кроку з параметрами
 $h_{min} = 0,1$ мм, $h_{max} = 0,3$ мм, $\Delta S_{max} = 0,1$ мм, $\Delta \varphi_{NZ} = 0\%$

збільшить трудомісткість подальшого складання (склеювання або використання інших способів з'єднання частин) у кінцеві вироби.

Підсумкові розрахунки для порівняння зведені до табл. 6.26, 6.27.

Таблиця 6.26 - Результати аналізу варіантів розміщення моделей, щодо ефективності використання робочого простору

Послідовна декомпозиція виробу	Кількість підпросторів U_i				Показник $\frac{N_{V0} + N_{V0.5}}{N_p}$
	N_p , шт.	N_{V0} , шт. ($N_{V0}/N_p, \%$)	N_{V1} , шт. ($N_{V1}/N_p, \%$)	$N_{V0.5}$, шт. ($N_{V0.5}/N_p, \%$)	
Варіант 0 (базовий, без декомпозиції)	10^3	616 (61,6%)	0	18 (1,8%)	0,634
Варіант 1 (поділ лопатки на дві частини)	10^3	552 (55,2%)	0	26 (2,6%)	0,678
Варіант 2 (поділ валу на дві частини)	10^3	454 (45,4%)	0	48 (4,8%)	0,502
Варіант 3 (поділ шліцьового валу на три частини)	10^3	454 (27,9%)	0	53 (5,3%)	0,507

Таблиця 6.27 - Результати аналізу варіантів розміщення моделей, щодо продуктивності виготовлення

Послідовна декомпозиція виробу	H_{build} , мм	Кількість шарів побудови, N_h		Відносне використання об'єму, %
		$\Delta\varphi_{NZ} = 0 \%$	$\Delta\varphi_{NZ} = 5 \%$	
Варіант 0 (базовий, без декомпозиції)	372,46÷387,29	2712÷6005	2209÷5618	4,04÷4,20
Варіант 1 (поділ лопатки на дві частини)	247,22÷307,87	2078÷4741	1519÷4741	5,18÷6,46
Варіант 2 (поділ валу на дві частини)	240,03÷345,87	1936÷5753	1558÷4742	6,80÷7,49
Варіант 3 (поділ шліцьового валу на три частини)	213,85÷279,73	1834÷4919	1377÷4919	6,65÷7,13

Для кожного варіанту розміщення визначено наступні відносні показники (запропоновані у розд. 4.5):

– коефіцієнт ефективності декомпозиції

$$K_{D0} = \frac{N_{V0(0)}}{N_p} = \frac{616}{1000} \approx 0,62, \text{ для початкової композиції};$$

$$K_{D1} = \frac{N_{V0(1)}}{N_p} = \frac{552}{1000} \approx 0,55 \text{ для 1-го варіанту декомпозиції};$$

$$K_{D2} = \frac{N_{V0(2)}}{N_p} = \frac{454}{1000} \approx 0,45 \text{ для 2-го варіанту декомпозиції};$$

$$K_{D3} = \frac{N_{V0(3)}}{N_p} = \frac{454}{1000} \approx 0,45 \text{ для 3-го варіанту декомпозиції};$$

– коефіцієнт ефективності використання робочого простору установки

$$K_{W0} = \frac{N_{V1(0)}}{N_p} = \frac{0}{1000} = 0, \text{ для композиції}.$$

$$K_{W1} = \frac{N_{V1(1)}}{N_p} = \frac{0}{1000} = 0, \text{ для 1-го варіанту декомпозиції};$$

$$K_{W2} = \frac{N_{V1(2)}}{N_p} = \frac{0}{1000} = 0, \text{ для 2-го варіанту декомпозиції};$$

$$K_{W3} = \frac{N_{V1(3)}}{N_p} = \frac{0}{1000} = 0, \text{ для 3-го варіанту декомпозиції};$$

– коефіцієнт ефективності декомпозиції для раціонального використання робочого простору установки

$$K_{DW0} = \frac{N_{V0(0)} + N_{V0.5(0)}}{N_p} = \frac{616 + 18}{1000} \approx 0,63, \text{ для композиції};$$

$$K_{DW1} = \frac{N_{V0(1)} + N_{V0.5(1)}}{N_p} = \frac{552 + 26}{1000} \approx 0,58, \text{ для 1-го варіанту декомпозиції};$$

$$K_{DW2} = \frac{N_{V0(2)} + N_{V0.5(2)}}{N_p} = \frac{454 + 48}{1000} \approx 0,50, \text{ для 2-го варіанту декомпозиції};$$

$$K_{DW3} = \frac{N_{V0(3)} + N_{V0.5(3)}}{N_p} = \frac{454 + 53}{1000} = 0,51, \text{ для 3-го варіанту декомпозиції}.$$

Показники демонструють достатність виконання декомпозиції 3D-моделей лопатки та валу. Декомпозиція шліцьового валу є надмірною, що демонструє показник K_D , котрий не зменшується з останнім кроком декомпозиції.

Відносні показники K_D , K_W , K_{DW} дозволяють на основі аналізу воксельної моделі виконувати оцінку просторового розподілу матеріалу. Величина коефіцієнту, близька до нуля, буде характеризувати конструкцію, яка не підходить для виконання відповідного завдання технологічної підготовки АМ-процесу. Виробам з більшими за величиною коефіцієнтами K_D , K_{DW} , відповідає більш високий рівень ефективності від застосування структурної оборотної декомпозиції. Також збільшення кількості частин виробу N_D призводить до істотного зростання ефективності застосування декомпозиції K_D .

За даними дослідження сформульовано наступні умови для раціональної декомпозиції (максимізації показника K_V):

- кратність розмірів частин виробу заданій величині (окремо по кожній з координатних осей X , Y , Z);
- мінімізація сумарної площі частин;
- мінімізація кількості частин;
- мінімізація кількості підпросторів з мінімальним (але не рівним нулю) питомим наповненням матеріалом виробу, тобто $K_{Vi} \in (0, 0.5)$.

Додаткове дослідження впливу орієнтації та розміщення у робочому просторі на статистичні характеристики пошарових 3D-моделей побудови групи виробів представлено у додатку В.

6.4 Адаптивне пошарове розсічення 3D-моделі виробу стосовно FDM-методу (3D-принтерів)

В даному підрозділі представлено вивчення можливості адаптивного розсічення 3D-моделі виробу на основі статистичного аналізу розподілу кутів між вектором напрямку побудови і нормалями поверхонь стосовно 3D-принтерів. 3D-принтери реалізують метод FDM, який є найбільш доступним з

адитивних методів. Практична реалізація виконувалася на 3D-принтері Ultimaker 3 Extended.

6.4.1 Дослідження впливу параметрів адаптивного розсічення на кількість шарів побудови

Дослідження можливостей запропонованого адаптивного розсічення моделі виконувалося шляхом визначення кількості шарів побудови на прикладі тестових 3D-моделей виробів, представлених на рис. 6.8 і 6.14.

Розсічення тестових моделей виконувалося за стратегіями з постійним та змінним кроком побудови для забезпечення порівняльного аналізу. Стратегія з постійним кроком виконувалась при $h_i = 0,06$ мм. Стратегія зі змінним кроком – при $\{h_i\}_{min} = 0,06$ мм, $\{h_i\}_{max} = 0,2$ мм і допустимою (максимальною) похибкою формування поверхні $\Delta_{Smax} = \{0,06; 0,1\}$ мм. Обраний діапазон кроків побудови є рекомендованим для 3D-принтерів фірми Ultimaker при використанні екструдера AA 0,4 мм. Запропонована адаптивна стратегія розсічення виконувалась при усіченні розподілу кутів $\Delta\varphi_{NZ} = [0, 20]\%$. Результати модельних розрахунків наведено в табл. 6.28.

Таблиця 6.28 - Результати пошарового розсічення тестових моделей промислових виробів за кількістю шарів

Модель (габаритні розміри, мм)	Пост-ий крок $h_i = 0,06$ мм	Змінний крок при усіченні розподілу $\Delta\varphi_{NZ}$, %					
		0	5	10	15	20	
Кількість шарів, N_L							
Допустима величина відхилення від правильної форми поверхні $\Delta_{Smax} = 0,06$ мм							
Вал (60×216×60)	1000	717	716	715	713	708	
Шнек (40×40×144)	667	576	530	456	407	392	
Корпус (210×210×125)	2084	949	921	898	876	853	
Сувенір (73×51×70)	1169	873	736	695	670	649	
Ємність (102x94x125)	2092	969	901	874	858	829	
Кришка (84×101×43)	721	676	610	592	577	565	
Допустима величина відхилення від правильної форми поверхні $\Delta_{Smax} = 0,1$ мм							
Вал (60×216×60)	1000	456	454	452	450	448	
Шнек (40×40×144)	667	338	317	281	257	249	
Корпус (210×210×125)	2084	729	720	709	703	696	
Сувенір (73×51×70)	1169	525	455	441	434	427	
Ємність (102x94x125)	2092	734	704	693	688	679	
Кришка (84×101×43)	721	406	370	358	351	344	

Порівняльний аналіз за кількістю шарів розсічення для конкретних 3D-моделей (табл. 6.28) показує перевагу стратегій зі змінним кроком в порівнянні з постійним кроком. Дано перевага є загальною для стратегій зі змінним кроком, незалежно від обраного підходу у визначенні кроку побудови. Адаптивне розсічення, виконане при $\Delta\varphi_{NZ} = 0\%$, дозволило зменшити кількість шарів на 43,7÷65,0% щодо стратегії з постійним кроком $h_i = 0,06$ мм для розглянутих тестових 3D-моделей. Усічення щільності розподілу кутів φ_{NZ} дозволило додатково зменшити кількість шарів побудови для всіх розглянутих 3D-моделей. При усіченні $\Delta\varphi_{NZ} = 5\%$ - на 48,7 ÷ 66,3% (порівняно з варіантом при $\Delta\varphi_{NZ} = 0\%$ на 0,4÷13,3%). При усіченні $\Delta\varphi_{NZ} = 10\%$ - на 50,3÷66,9% (щодо варіанту при $\Delta\varphi_{NZ} = 0\%$ на 0,9÷16,9%). Взаємозв'язок відносної кількості шарів побудови тестових 3D-моделей від величини $\Delta\varphi_{NZ}$, представлено на рис. 6.54.

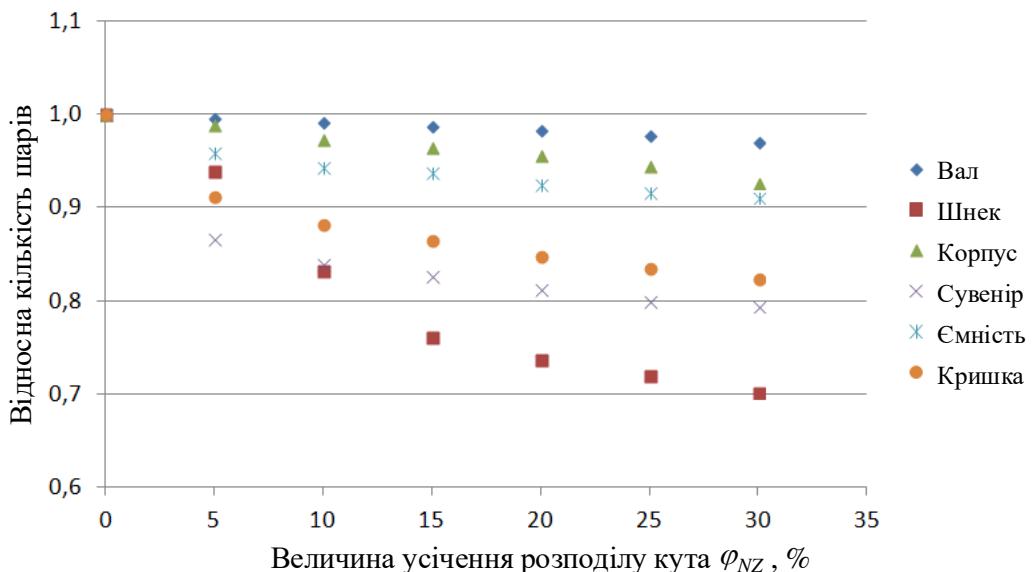


Рисунок 6.54 - Взаємозв'язок відносної кількості шарів побудови тестових 3D-моделей з величиною $\Delta\varphi_{NZ}$

Результати модельних розрахунків на прикладі 3D-моделей виробів, що відрізняються за геометричною складністю поверхонь, дозволили виявити деяку тенденцію. На прикладі 3D-моделі валу істотних відмінностей між варіантами стратегії розсічення зі змінним кроком не спостерігається. Дано відмінність за кількістю шарів N_L збільшується з ростом геометричної складності виробів. Отримані дані (табл. 6.28) дозволяють зробити висновок

про ефективність стратегії з урізанням розподілу кута Φ_{NZ} для виробів, що мають досить складні за геометрією поверхні. В даному дослідженні такі 3D-моделі кришки, сувеніру та шнеку (в порядку зростання ефективності, що продемонстровано на рис. 6.54).

6.4.2 Аналіз ефективності адаптивного розсічення 3D-моделей

З методичних міркувань оцінка можливостей розробленої стратегії розсічення 3D-моделей виконувалася на основі порівняння з можливостями адаптивного розсічення пропонованого в Ultimaker Cura (безкоштовне ПО) на тестових 3D-моделях (див. рис. 6.8 і 6.14).

При дослідженні адаптивного розсічення в Ultimaker Cura розглянуто різні комбінації наступних параметрів:

- adaptive layers minimum variation (розмах кроку побудови), $R_h = 0,14$ мм;
- adaptive layers variation step size (різниця по h_i для суміжних шарів), $\Delta h = 0,01 \div 0,1$ мм;
- adaptive layers threshold (ймовірність завдання h_i , меншого за величиною), $p_h = 50 \div 300\%$.

У табл. 6.29 наведено дані, отримані в результаті розсічення тестових 3D-моделей (див. рис. 6.8 і 6.14) з використанням стратегій з постійним і змінним кроком побудови.

Таблиця 6.29 - Результати пошарового розсічення тестових 3D-моделей в Ultimaker Cura

Модель (габаритні розміри, мм)	Постійний крок, $h = 0,06$ мм		Змінний крок	
	Кількість шарів N_L	Час побудови t_b , год.	Кількість шарів N_L	Час побудови t_b , год.
Вал ($60 \times 216 \times 60$)	996	47,22	$433 \div 624$	$31,1 \div 37,1$
Шнек ($40 \times 40 \times 144$)	663	20,23	$307 \div 472$	$13,5 \div 17,1$
Корпус ($210 \times 210 \times 125$)	2080	132,32	$694 \div 759$	$58,2 \div 62,3$
Сувенір ($73 \times 51 \times 70$)	1165	12,13	$457 \div 666$	$6,7 \div 8,1$
Ємність ($102 \times 94 \times 125$)	2088	80,77	$701 \div 823$	$36,3 \div 41,9$
Кришка ($84 \times 101 \times 43$)	717	31,77	$399 \div 645$	$21,8 \div 29,3$

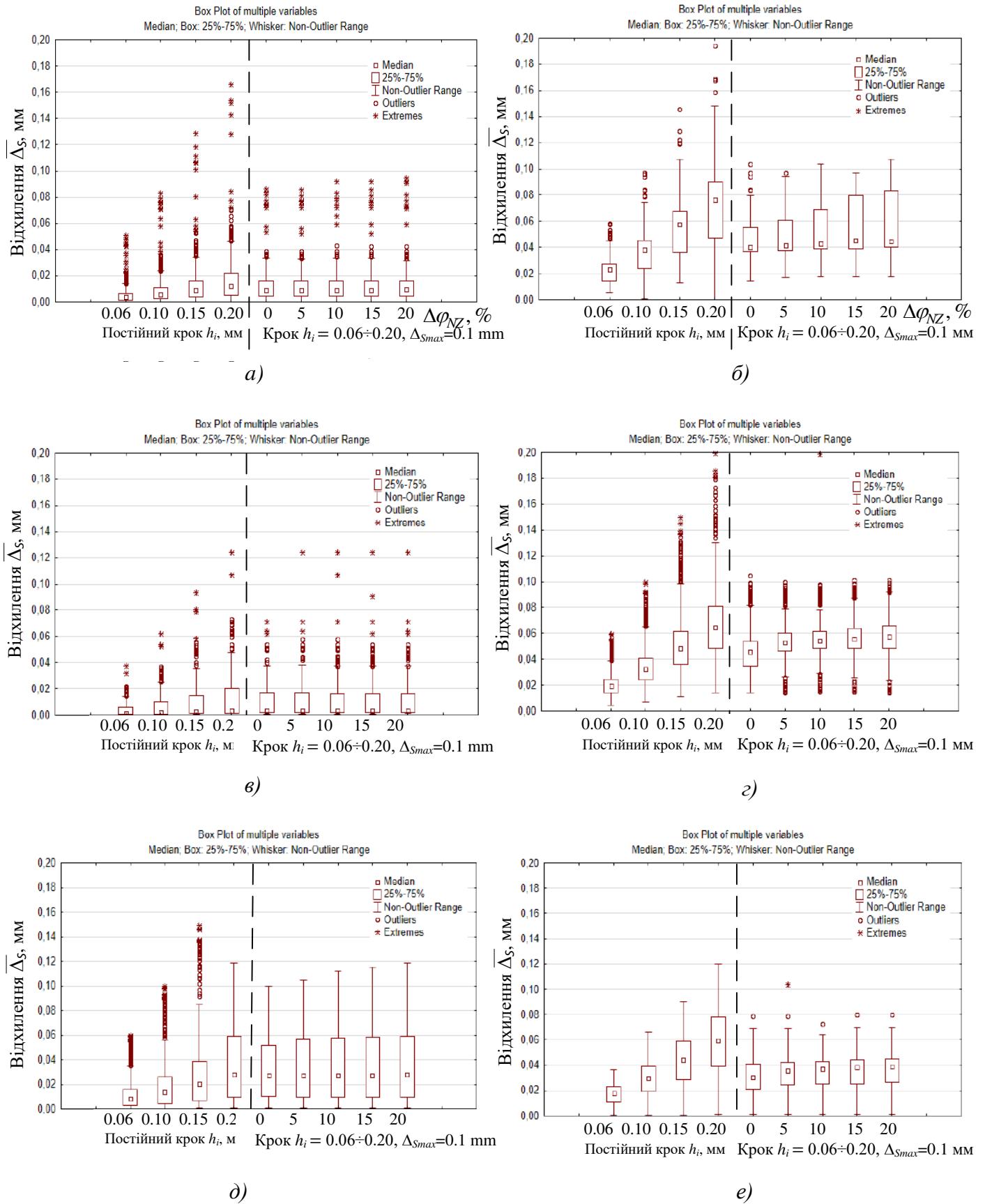
Аналіз одержаних даних (табл. 6.29) дозволив виявити деяку перевагу запропонованого адаптивного розсічення з усіченням кутів Φ_{NZ} по відношенню

до використаного в Ultimaker Cura. Дане спостереження стосується деяких 3D-моделей виробів, які характеризуються досить складною геометрією поверхонь. Способ адаптивного розсічення, який використовується в роботі [282] (відповідає розробленому способу при $\Delta\varphi_{NZ} = 0$), поступається за кількістю шарів для всіх 3D-моделей, але в разі кришки відмінність несуттєва (менше 2%). Стосовно до моделі кришки вдається на всьому розглянутому діапазоні величин $\Delta\varphi_{NZ} = 5 \div 30\%$ отримувати меншу кількість шарів побудови. Модель валу не дозволяє зменшувати кількість шарів при використанні розробленого адаптивного розсічення незалежно від величини $\Delta\varphi_{NZ}$. Адаптивне розсічення при $\Delta\varphi_{NZ} \geq 5\%$ дозволяє наблизитися за кількістю шарів і, навіть, отримати менші значення до одержуваних у Ultimaker Cura для моделей шнеку, сувеніру та ємності. Для моделі корпусу – це спостерігається для величин $\Delta\varphi_{NZ} \geq 20\%$.

6.4.3 Статистичний пошаровий аналіз величин відхилень від правильної форми поверхні

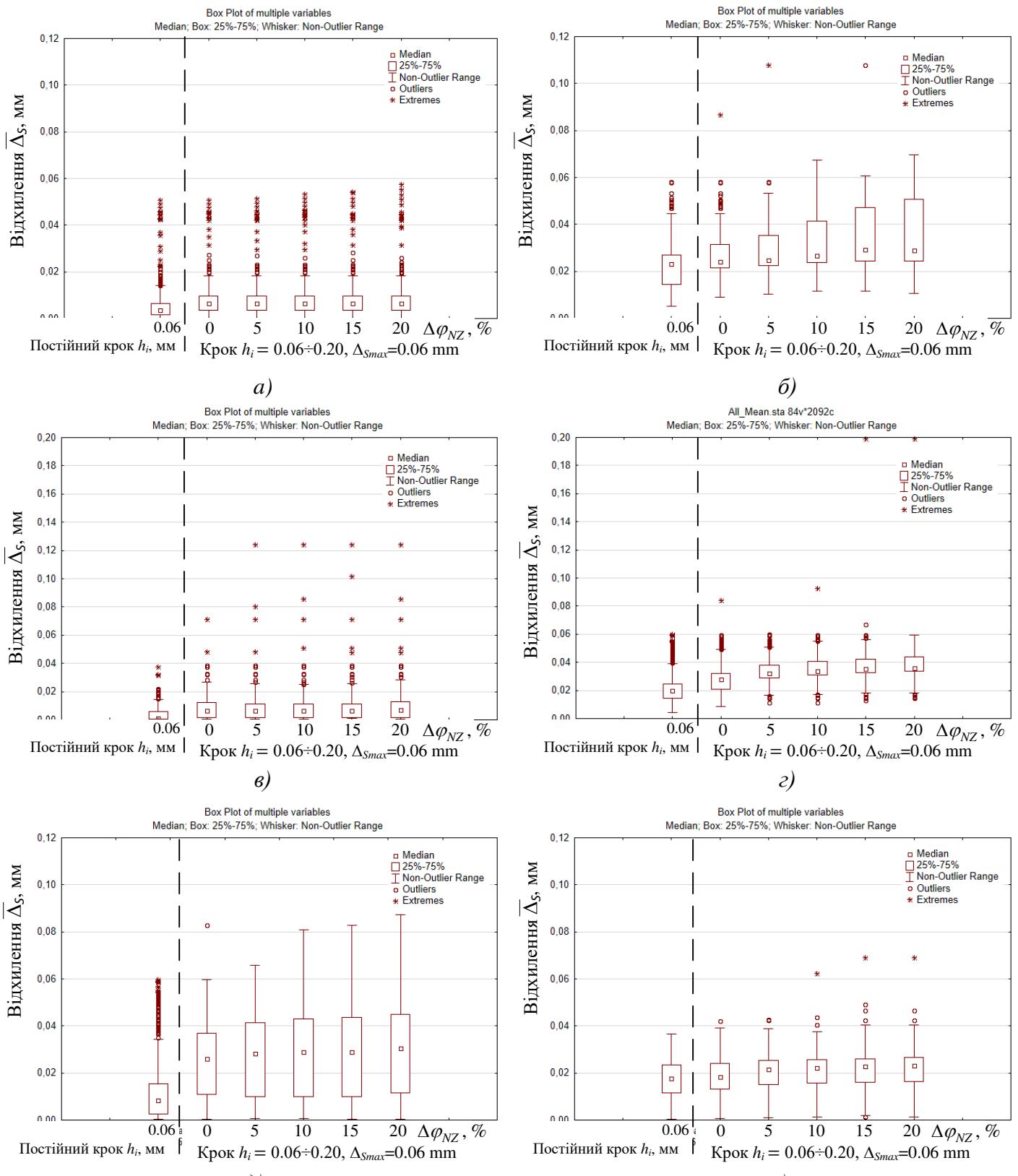
Використання адаптивного пошарового розсічення орієнтоване на гарантування забезпечення заданого рівня якості і точності одержуваних поверхонь виробів [315, 316]. Тому додатково виконувалась пошарова оцінка відхилень від правильної форми $\Delta_{S_{max}}$ за середньоарифметичним значенням $\overline{\Delta_s}$. За прогнозовані відхилення від правильної форми приймалися висота виступу або глибина западини, що утворюються на поверхні в результаті ефекту «сходинок» [282].

Статистичний аналіз результатів пошарового розрахунку відхилень від правильної форми $\overline{\Delta_s}$ для різних варіантів стратегії розсічень 3D-моделей з використанням діаграм розмаху "Box Whiskers", представлено на рис. 6.55, 6.56. На рис. 6.55 представлена діаграми розподілу $\overline{\Delta_s}$ для порівняння стратегій з постійним кроком побудови $h_i = \{0,06; 0,10; 0,15; 0,20\}$ мм, зі змінним кроком при $\Delta\varphi_{NZ} = 5 \div 20$ і заданому обмеженні $\Delta_{S_{max}} = 0,1$ мм. На рис. 6.56 - при



а) вал; б) шнек; в) корпус; г) сувенір; д) ємність; е) кришка

Рисунок 6.55 - Статистичний пошаровий аналіз середньоарифметичного відхилення від правильної форми поверхні Δ_s



а) вал; б) шнек; в) корпус; г) сувенір; д) ємність; е) кришка

Рисунок 6.56 - Статистичний пошаровий аналіз середньоарифметичного відхилення від правильної форми поверхні Δ_S

заданому обмеженні $\Delta_{S_{max}} = 0,06$ мм.

На прикладі більшості 3D-моделей при розсіченні зі змінним кроком не спостерігається істотних відмінностей, тобто величина усічення $\Delta\varphi_{NZ}$ не сильно впливає на характеристики розподілу $\overline{\Delta_s}$. Для більшості моделей отримується розподіл $\overline{\Delta_s}$, який приблизно відповідає розсіченням з постійним кроком побудови $h_i = 0,10 \div 0,15$ мм. Така обставина пояснюється наявністю обмеження $\Delta_{S_{max}} = 0,1$ мм, як найбільш характерною для побудови с кроком $h_i = 0,10 \div 0,15$ мм. Наступний аналіз (представленний на рис. 6.56) розсічень при завданні $\Delta_{S_{max}} = 0,06$ мм підтверджує таке пояснення.

На прикладах 3D-моделей шнеку, сувеніру і ємності спостерігається найбільший вплив обраних параметрів розсічення на розподіл величини $\overline{\Delta_s}$, що є цілком очікуваним, так як для даних моделей вдалося найбільш суттєво зменшити кількість шарів побудови, а, відповідно, знизити час на їх виготовлення.

Готові вироби, одержані за тестовими 3D-моделями представлено на рис. 6.57.

За даними дослідження сформульовано наступні умови для раціонального використання запропонованого адаптивного розсічення 3D-моделі:

- виріб, що містить досить велику кількість поверхонь зі складною геометрією або з досить великим розмахом розподілу кута між нормальними поверхонь та віссю Z (напрямком побудови);
- підбір величини усічення $\Delta\varphi_{NZ} \in [0, 0,2]$ з урахуванням допустимого локального збільшення відхилення від правильної форми;
- можливість зменшити величину усічення розподілу $\Delta\varphi_{NZ}$ для більш складних за геометрією виробів.

Виявлений діапазон раціонального усічення розподілу $\Delta\varphi_{NZ}$ дозволяє додатково зменшити час побудови на $0,7 \div 30,1\%$ у порівнянні з існуючими стратегіями розсічення за змінним кроком [282].



а)



б)



в)



г)



д)



е)

а) вал; б) шнек; в) корпус; г) сувенір; д) ємність; е) кришка

Рисунок 6.57 - Фотографії готових виробів

Одержані результати показують, що ефективність запропонованого адаптивного розсічення зростає зі збільшенням геометричної складності виробу, а також із його застосуванням для групи виробів, розміщених на платформі установки, буде забезпечувати більш суттєве зменшення кількості шарів побудови.

Вдалося підтвердити гіпотезу щодо можливостей статистичного аналізу розподілу кутів φ_{NZ} (між віссю Z і нормалями) поверхонь, які потрапили в перетин шару з урахуванням їх відносної площин, які дозволяють науково-обґрунтовано визначати крок побудови для забезпечення заданої точності і зменшення часу побудови виробу шляхом використання адаптивного розсічення 3D-моделі.

Несуттєве урізання розподілу кутів між віссю Z і нормалями поверхонь $\Delta\varphi_{NZ} = 5 \div 20\%$ дозволяє для 3D-моделей складних виробів зменшити час їх побудови на $0,7 \div 30,1\%$.

6.5 Практична реалізація результатів дослідження

В Україні, з урахуванням стану економіки, можливостей щодо реалізації розроблених технічних рішень суттєво менше у порівнянні з розвинутими країнами у цій галузі, такими як США, Німеччина, Японія, Китай та ін. Проте, вдалось отримати практичні результати, які свідчать про достатнє підвищення технологічних показників при одержанні складних виробів з різних галузей промисловості.

Розроблено систему технологічної підготовки матеріалізації складних виробів адитивними методами, що дозволяє виконувати оптимізаційні задачі по визначеню раціональних параметрів пошарової побудови виробів на основі аналізу їх 3D-моделей. Практично реалізовано вирішення задачі розміщення 3D-моделей виробів у робочому просторі шляхом її виконання в ручному режимі, з використанням методу Монте-Карло та генетичного алгоритму. Можливість суміщення режимів розміщення дозволяє істотно підвищити ефективність використання робочого простору пошарової побудови.

Розроблено методики та алгоритми для виконання структурної оборотної декомпозиції, орієнтації та розміщення виробів для раціонального заповнення робочого простору та пошарової побудови за удосконаленою адаптивною стратегією розсічення 3D-моделей, що дозволяють значно скоротити об'єм експериментальних досліджень та використати їх у промислових умовах.

Виходячи з результатів досліджень, запропоновано технічні рішення щодо виконання наступних задач (рис. 6.58): структурна оборотна декомпозиція (пат. України 117760), раціональна орієнтація (пат. України 117776), розміщення у робочому просторі (пат. України 117760), визначення стратегій розсічення (пат. України 117764) і формоутворення шарів (пат. України 117759, 117768, 117777). У додатку Д представлено перелічені патенти України на технічні рішення.

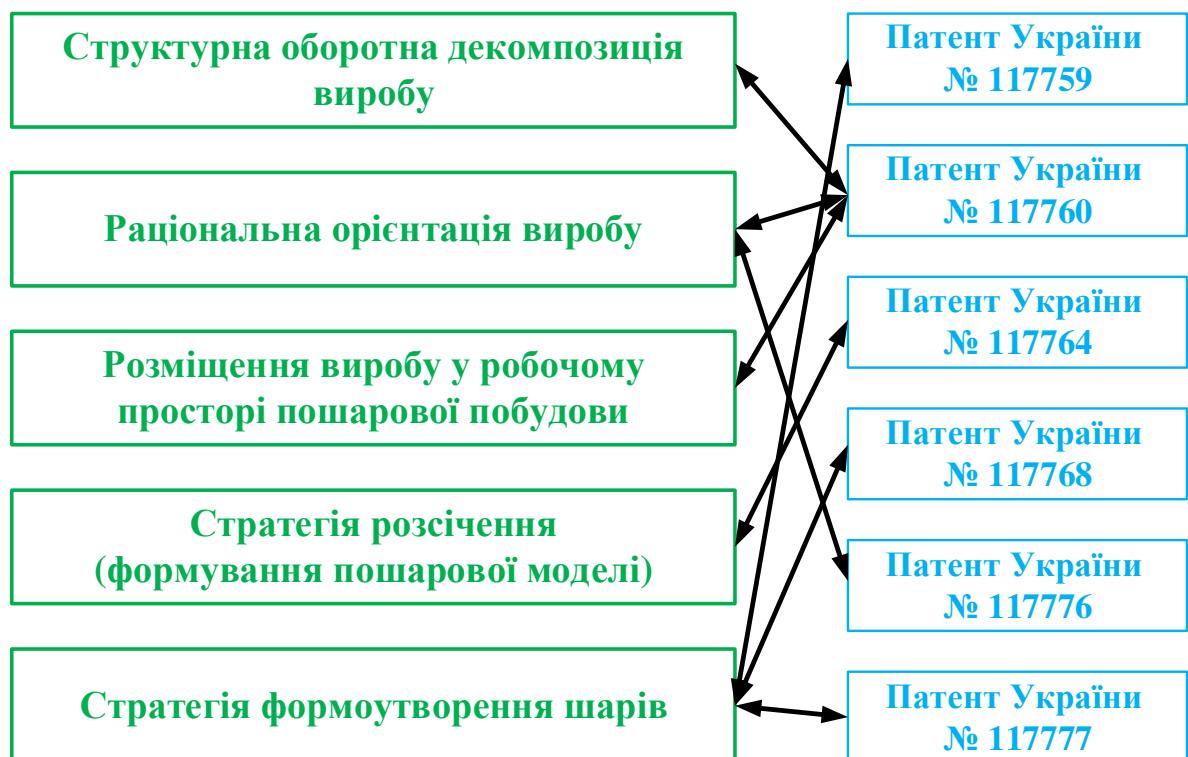


Рисунок 6.58 – Одержані патенти щодо виконання оптимізаційних задач технологічної підготовки АМ-процесів пошарової побудови складних виробів

Практичні рекомендації щодо виконання технологічної підготовки впроваджено у виробничих умовах НТУ «ХПІ» при виготовленні виробів на 3D-принтерах Ultimaker 3 Extended.

Готові вироби представлено на рис. 6.59. Вироби представлена на



a)



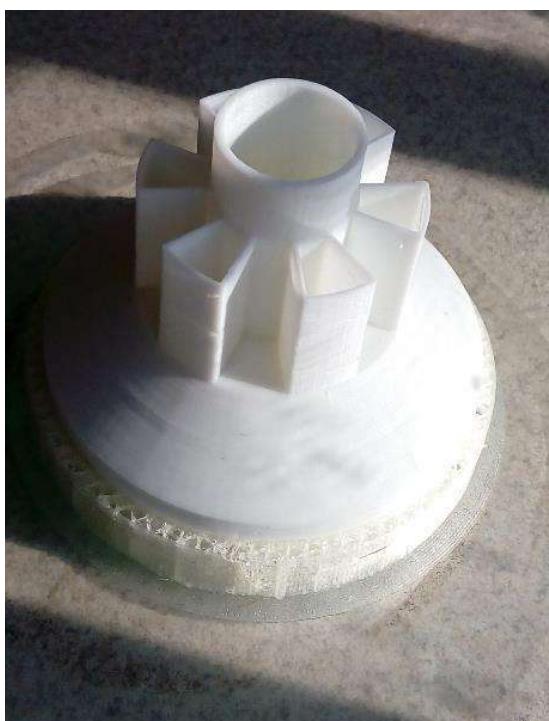
б)



в)



г)



д)



е)

Рисунок 6.59 – Вироби одержані у виробничих умовах НТУ «ХПІ»

рис. 6.59 a - e виготовлялись за рядом замовлень від ТОВ «Сталекс», на рис. 6.59 g – від ТОВ Фірма «КОДА». На рис. 6.59 d,e – для ТОВ кондитерська фабрика “Кондитер Т Престиж”.

Застосовані підходи щодо ефективного виконання задач вибору раціональної орієнтації і розміщення моделі виробу у робочому просторі установки, та застосування адитивного розсічення дозволили зменшити час побудови (на 18÷55%) та об'єму матеріалу на підтримуючі структури (зменшення матеріалу підтримки у 1,4÷3 рази) а, отже, і собівартості одержаних виробів на 12÷36%.

Висновки за розділом.

1. Практична реалізація розробленої системи технологічної підготовки виготовлення складних виробів адитивними методами показала переваги рішення задач на основі комплексного статистичного аналізу тріангуляційної, воксельної і пошарової моделей виробів в науково-обґрунтованому виборі раціональних варіантів вирішення таких оптимізаційних задач, як раціональна орієнтація та розміщення в робочому просторі АМ-установки з формуванням шарів (вибором параметрів адаптивного пошарового розсічення).

2. Розширення можливостей застосування методів пошарової побудови виробів без обмежень на їх складність, підвищення продуктивності та зниження собівартості виготовлення вдалось досягти забезпеченням рівномірного розподілу елементарних об'ємів виробів у робочому просторі пошарової побудови АМ-установки. Розглядання множини можливих варіантів структурної декомпозиції вихідних тріангуляційних 3D моделей (створення варіантів формування частин виробів) та їхньої орієнтації на етапі розміщення у робочому просторі дозволяє одержувати розподіл елементарних об'ємів матеріалу виробів наближений до рівномірного.

3. Порівняльний аналіз досліджених показників між варіантами розміщення 3D-моделей складних виробів у робочому просторі АМ-установки з використанням генетичного алгоритму і розробленої процедури, дозволив

виявити достатньо великий вплив ймовірнісних закономірностей на технологічні показники пошарової побудови. Тому виконання декількох варіантів розташування групи виробів дозволило обрати найбільш раціональний за вибраним критерієм. Модельні розрахунки показують, достатність виконання до $4 \div 8$ варіантів для невеликої кількості виробів ($3 \div 6$ моделей). В загалі кількість створюваних варіантів розміщення 3D-моделей у робочому просторі не повинна бути меншою від кількості виробів з урахуванням їхніх частин, утворених у разі виконання декомпозиції.

4. Модельне дослідження на прикладі складних виробів підтвердило здібність розробленої процедури підвищення ефективності, що призводить до зміни показників наповненості робочого простору. Дані показники демонструють тенденцію до рівномірного розподілу матеріалу у робочому просторі АМ-установки. Дане спостереження також підтверджується отриманими гістограмами розподілу матеріалу виробів.

5. Запропоновані відносні показники розподілу матеріалу в робочому просторі пошарової побудови дозволяють на основі аналізу воксельної моделі виконувати оцінку ефективності виконання технологічної підготовки. Величина коефіцієнту, близька до нуля, буде характеризувати конструкцію, яка не підходить для виконання відповідного завдання технологічної підготовки АМ-процесу. Виробам з більшою величиною даних коефіцієнтів відповідає більш високий рівень ефективності від застосування структурної оборотної декомпозиції виробу.

6. За даними дослідження сформульовано наступні умови для раціональної декомпозиції: кратність розмірів частин виробу заданій величині (окремо по кожній з координатних осей X , Y , Z); мінімізація сумарної площин частин; мінімізація кількості частин; мінімізація кількості підпросторів з мінімальним (але не рівним нулю) питомим наповненням матеріалом виробу.

7. Виконано апробацію розробленого алгоритму адаптивного розсічення 3D-моделей виробів (формування пошарової моделі) заснованого на статистичному аналізі розподілу кутів між віссю Z і нормалями поверхонь.

Виходячи з одержаних даних щодо адаптивної стратегії розсічення 3D-моделей, найбільший вплив має допустима похибка формоутворення (величина відхилення від правильної форми поверхні), що дозволяє при збільшенні її величини удвічі зменшити кількість кроків на 28÷45,6% у залежності від обраної орієнтації. Усічення площини для гістограм розподілу кута між векторами напрямку побудови та нормалями поверхні на 5% дозволяє зменшити кількість кроків на 12,1÷33,0%. Ефективність від використання стратегії пошарового розділення з усіченням збільшується для варіантів з кращою (більш раціональною) орієнтацією виробів.

8. Використання запропонованої стратегії побудови з корекцією кроку, щодо найближчих плоских поверхонь, дозволяє істотно розширити можливості регулювання точності пошарового виготовлення виробів та зменшити похибки формування плоских поверхонь. Необхідна умова для застосування пропонованого рішення – наявність плоских поверхонь виробу. Достатня умова забезпечується на етапі задання орієнтації виробу на робочій платформі установки шляхом орієнтації векторів нормалей плоских поверхонь з найбільшою площею уздовж осі Z.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Створено основу для оцінки технологічності конструкції виробів, одержуваних адитивними методами пошарової побудови. Оцінку технологічності конструкції виробу необхідно виконувати на основі аналізу тріангуляційної, воксельної та пошарової 3D-моделі за складовими складності виробу: геометричної, структури матеріалів, ієрархічної та функціональної. Запропоновані показники складності виробу забезпечують науково обґрунтовану оцінку відповідності конструкторських вимог вибраної стратегії виготовлення з використанням АМ-процесів.

2. Аналіз впливу параметрів тріангуляції (допустимої похибки, максимально допустимого розміру ребра та двогранного кута між суміжними гранями) на кількість трикутних граней, що замінюють поверхню CAD-моделі, дозволяє оцінювати геометричну складність виробів та, отже, їх технологічність виготовлення адитивними методами пошарової побудови.

3. Запропоновано та обґрунтовано визначати показник технологічності щодо ефективності оборотної структурної декомпозиції виробу на основі статистичного аналізу розподілу елементарних об'ємів виробу (його воксельної 3D-моделі). Запропонований показник дозволяє з досить високою інформативністю оцінювати пристосованість конструкції для виготовлення АМ-процесами. Також на основі результатів статистичного аналізу воксельної моделі виробу та впливу числа його частин на використаний питомий об'єм робочого простору, виявлено показники прогнозованої ефективності застосування структурної оборотної декомпозиції. Запропоновані показники становлять інтерес для прийняття обґрунтованого рішення щодо раціонального застосування декомпозиції для максимізації ефективності використання робочого простору АМ-установки.

4. Запропоновано методологію технологічної підготовки АМ-процесів, в рамках якої в єдиному комплексі вирішуються задачі структурної оборотної декомпозиції, раціональної орієнтації, вибору стратегії пошарового

формоутворення та розташування 3D-моделі виробу в робочому просторі на основі єдиних критеріїв оцінки ефективності матеріалізації виробів адитивними методами пошарової побудови. Визначено необхідні та достатні умови для спільноговирішення оптимізаційних задач. В рамках методології технологічної підготовки АМ-процесів розроблено схему виконання оптимізаційних задач. Запропонована схема є трудомісткою через істотне збільшення кількості варіантів вирішення задач технологічної підготовки і, відповідно, варіантів матеріалізації групи виробів. З метою зменшення кількості варіантів розрахунку запропоновано виконання попередньої оцінки конструкції виробу на основі аналізу тріангуляційної, воксельної та пошарової 3D-моделей щодо доцільності виконання задач технологічної підготовки або їх спрощеного рішення (мінімізації варіантів їх реалізації).

5. Рішення оптимізаційної задачі технологічної підготовки за визначенням раціональної орієнтації виробу в області пошарової побудови на основі цільової функції мінімізації площі поверхні з найбільшою величиною похибки формоутворення показує досить високу ефективність стосовно до виробів зі складною геометрією. Визначення області значень кутів повороту тріангуляційної 3D-моделі дозволить розширити можливості технологічної підготовки шляхом збільшення варіантів раціональної орієнтації, що необхідно при вирішенні наступних задач з розташування виробу в робочій області побудови.

6. Сформульовано принципи ефективного використання робочого простору установок на основі статистичного аналізу щільності розподілу елементарних об'ємів окремих виробів та їх композицій в робочому просторі установки. Розбиття робочого простору на підпростори і визначення їх відносного наповнення матеріалом виробів дозволяє виконувати оцінку ефективності таких трьох задач: структурна оборотна декомпозиція, орієнтація та розміщення.

7. Розроблено систему технологічної підготовки матеріалізації складних виробів адитивними методами (на рівні готового програмного продукту), що

дозволяє досліджувати статистичні характеристики технологічних ознак АМ-процесів без проведення довготривалих дорогих експериментальних випробувань. Система дозволяє виконувати основні задачі технологічної підготовки, створювати 3D-моделі робочого простору установки з завантаженими 3D-моделями виробів для їх підготовки до ефективної матеріалізації з можливістю виконання структурної оборотної декомпозиції, завдання орієнтації та їх положення. Включені інструменти для статистичного аналізу властивостей 3D-моделей і визначення варіантів вирішення оптимізаційних задач.

8. Статистичний аналіз розподілу фрактальної розмірності контурів областей пошарового формоутворення дозволяє науково-обґрунтовано визначати геометричну складність контурів областей пошарового формоутворення виробу. Використання мір, що задаються відносно довжини контуру, дозволяє отримувати фрактальну розмірність незалежно від масштабу контуру. При такому підході одержані розмірності є застосовними для виконання порівняльного аналізу складності контурів. Мінімізація відхилення фрактальної розмірності від евклідової дозволить визначити область скейлінга, яка повинна відповідати раціональним значенням геометричних обмежень обраної технології та АМ-обладнання для матеріалізації заданої 3D-моделі.

9. Розроблена підсистема розміщення 3D-моделей виробів в робочому просторі вирішує задачу у ручному режимі, з використанням методу Монте-Карло, генетичного алгоритму та процедури для підвищення ефективності розміщення. Можливість суміщення режимів роботи дозволяє істотно підвищити ефективність вирішення задачі розміщення воксельних 3D-моделей у робочому просторі АМ-установки. Модельні дослідження на основі групи 3D-моделей виробів з різною геометричною складністю поверхонь дозволили виявити рекомендації щодо завдання раціональних параметрів та режимів роботи. Розроблені алгоритми дозволяють поліпшити наступні досліджувані ознаки: зменшення висоти побудови до 67%; збільшення відносної кількості заповнених підпросторів (тих, що мають більше 20% матеріалу) до 48%;

зменшення кількості шарів побудови при адитивному розсіченні зі змінним кроком до 38%.

10. Проведено апробацію алгоритму адаптивного розсічення 3D-моделей виробів, який базується на статистичному аналізі розподілу кутів між віссю Z та нормалями поверхонь. Дані про адаптивну стратегію розсічення 3D-моделей показали, що найбільший вплив має допустима похибка формоутворення. Збільшення величини цієї похибки вдвічі дозволяє зменшити кількість кроків на 28-45,6%, залежно від вибраної орієнтації. Усічення площі для гістограм розподілу кута між вектором напрямку побудови та нормалями поверхні на 5% дозволяє зменшити кількість кроків на 12,1-33,0%. Ефективність від використання розробленої стратегії розсічення збільшується для варіантів з раціональною орієнтацією виробів.

11. Практична реалізація розробленої системи технологічної підготовки процесів виготовлення складних виробів адитивними методами показала переваги використання комплексного статистичного аналізу тріангуляційної, воксельної та пошарової 3D-моделей виробів для раціонального вибору параметрів адаптивного пошарового розсічення. Отримані результати досліджень створюють умови для швидкого впровадження сучасних технологій в промисловості України та випуску конкурентоспроможної продукції, яка має потенціал для експорту.

СПИСОК ВИКОРИСТАННИХ ДЖЕРЕЛ

1. ISO/ASTM. 52900: 2017 Additive Manufacturing — General Principles — Terminology. American Society for Testing and Materials (ASTM International): West Conshohocken, PA, USA. 2017. – Режим доступу: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm: 52900:ed-1:v1:en>. – Дата звернення: 15.02.2018.
2. Analysis of General and Specific Standardization Developments in Additive Manufacturing from a materials and technological approach / A. Garcia-Dominguez, J. Claver, A.M. Camacho, M.A. Sebastian // IEEE Access, 2020. P. 1–9. doi: 10.1109/access.2020.3005021.
3. Vora H. D. comprehensive review: metrology in additive manufacturing and 3D printing technology / H. D.Vora, S. A. Sanyal // Progress in Additive Manufacturing, 2020. - 35 p. doi: 10.1007/s40964-020-00142-6.
4. Gibson I. Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing / I. Gibson, D. W. Rosen, B. Stucker. Springer Verlag. - New York, 2010. - 473 p. doi: 10.1007/978-1-4419-1120-9.
5. Jiménez M. Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects / M. Jiménez, L. Romero, I. A. Domínguez, M. del M. Espinosa and M. Domínguez // Complexity in Manufacturing Processes and Systems 2019. HindawiArticle ID 9656938, 2019. - 30 p. doi: 1076-2787 10.1155/2019/9656938.
6. Shears A. 3D Printing Raised Relief / Topographic Maps: A Cartographically Sound Method / A. Shears, L. Jr. Stocks, J. Bagg. Stocks & Bagg, 2016. - 36 p. doi: 10.5281/zenodo.15912.
7. Gibson I. Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker. Springer Science, 2015. - 510 p.
8. Интегрированные генеративные технологии: учеб. пособие [для студ. выс. учеб. заведений] / А.И. Грабченко, Ю.Н. Внуков, В.Л. Добросок [и др.]; под ред. А.И. Грабченко. Харьков: НТУ "ХПІ", 2011. - 416 с.

9. Rosen D.W. What are Principles for Design for Additive Manufacturing? 1st International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2014). 26-28 May 2014, Singapore. doi: 10.3850/978-981-09-0446-3_027.
10. Wohlers Report 2016. 3D Printing and additive manufacturing state of the industry. Annual worldwide progress report. 2016. – Режим доступу: <https://wohlersassociates.com>.
11. Wohlers report 2014: 3D printing and additive manufacturing state of the industry. Annual worldwide progress report. Fort Collins, CO: Wohlers Associates. 2014. – Режим доступу: <https://wohlersassociates.com>.
12. Технические характеристики BigRep ONE. Сайт компании BIGREP. 2017. – Режим доступу: <https://bigrep.com/ru/bigrep-one/технические-характеристики>.
13. Solid print: making things with a 3D printer changes the rules of manufacturing. The Economist. 2016. – Режим доступу: www.economist.com/node/21552892.
14. Sood A.K. Study on parametric optimization of fused deposition modelling (FDM) process [Текст]: A thesis submitted in fulfillment of the requirement for the award of the degree of doctor of philosophy in mechanical engineering by Anoop Kumar Sood. ROLL NO. 507ME012) National institute of technology rourkela - 769008, India – 2011. - 207 p.
15. Чернышов С.И. Повышение эффективности интегрированных технологий послойного выращивания изделий на основе статистического прогнозирования: дис... канд. техн. наук: 05.02.08 / Чернышов Сергей Иванович. - Харьков, 2006. - 327 с.
16. Грабченко А.І. Сучасні технології матеріалізації комп'ютерних моделей: Навч. Посібник / А.І. Грабченко, В.Л. Добросок. - Х.: НТУ "ХПІ", 2009. - 86 с.
17. Андрощук Г. О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку / Г. О. Андрощук // Наука, технології, інновації. 2017. №1. С. 68-77. – Режим доступу: <http://ekmair.ukma.edu.ua/bitstream/handle/123456789/12990/>

Androshchuk_Adutyvni_tekhnolohii.pdf?sequence=1&isAllowed=y. – Дата звернення: 02.10.2022.

18. Грабченко А. И. Систематика интегрированных генеративных технологий формообразования / А. И. Грабченко, В. Л. Добросок, С. И. Чернышов, Я. Н. Гаращенко // Сучасні технології у машинобудуванні: Збірник наукових статей. Том 1. - Харків: НТУ "ХПІ", 2006. - С. 312-342.
19. Добросок В.Л. Классификация интегрированных процессов механической обработки материалов / В.Л. Добросок, Е.В. Островерх, Н.Ф. Наконечный, Ю.Б. Витязев // Резание и инструменты в технологических системах, Вып. 88. Харьков: НТУ “ХПІ”. 2018. - С. 51-73.
20. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления: монография / Товажнянский Л.Л., Грабченко А.И., Чернышов С.И., Верезуб Н.В., Витязев Ю.Б., Добросок В.Л., Кнут Х., Лиерат Ф. Под. ред. Товажнянского Л.Л., Грабченко А.И. Харьков: ОАО "Модель Вселенной", 2005. - 224 с.
21. Грабченко А.И. Все о стереолитографии. Мир техники и технологий / А.И. Грабченко, С.И. Чернышов, Ю.Б. Витязев // Харьков. 2003. №№ 1-7.
22. Товажнянский Л.Л. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления / Л.Л. Товажнянский, А.И. Грабченко, С.И. Чернышов, Н.В. Верезуб, Ю.Б. Витязев, Х. Кнут, Ф. Лиерат. Под. ред. Л.Л. Товажнянского, А.И. Грабченко. Харьков: ОАО «Модель Вселенной», 2002. - 140 с.
23. Кулагин В.В. Изготовление оснастки с использованием стереолитографических моделей / В.В. Кулагин, С.В. Скородумов. Литейное производство. 1999. № 7. - С. 11-14.
24. 3D Printing. Rapid Prototyping Report. 1998. Vol.8. № 5. - P. 5.
25. Carter W. T. Direct Laser Sintering of Metals / W. T. Carter, M. G. Jones // Beitrag zum Solid Free form Fabrication Symposium. - Austin, Texas. 1991. - P. 51-59.

26. Cheng W. Multiobjective optimization of the part building orientation in Stereolithography / W. Cheng, J. Y. H Fug, A. Y. C.Nee, Y. S. Wong, H. T. Loh, T. Miyazawa // Rapid Prototyping Journal. Vol.1, № 4. 1995.
27. Gebhardt A. Rapid Prototyping: Werkzeuge fur die schnelle Productentwicklung. Munchen, Wien; Hanser, 1996. - 407 p.
28. Geiger M. Multiphase Jet Solidification / M. Geiger, W. Steger, M. Greul, M. Sintel EARP newsletter. 1994. № 3. - P. 8-9.
29. Jacobs P.F. Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of StereoLithography. USA: SME, 1992. - 434 p.
30. Konig W.A. u.a. Rapid Prototyping. Bedarfund Potentiale. VDI-Z135. 1993. Vol. 8, - P. 92-97.
31. Pak S. Laminated Object Manufacturing. Medical Device. 1994. №11. - P. 47-48.
32. Pham D.T. An overview of Rapid Prototyping and Rapid Tooling / D.T. Pham, S.S. Dimov // Symposium on the 50 anniversary of Department of Manufacturing Engineering of Budapest University of BUTE. - Budapest. 2001. - P. 75-88.
33. Yu H.Z. Non-beam-based metal additive manufacturing enabled by additive friction stir deposition / H. Z. Yu, M. E. Jones, G. W. Brady et al. Scr Mater 153, 2018. - P. 122–130.
34. Johannes S.J., Keicher D.M., Lavin J.M., et al. Multimaterial aerosol jet printing of passive circuit elements / S.J. Johannes, D.M. Keicher, J.M. Lavin, et al. // SFF symposium proceedings, 2018. - pp. 473–478.
35. Kumar S. Additive Manufacturing Processes, 2020. - 205 p. doi: 10.1007/978-3-030-45089-2.
36. Nguyen A.K. Two-photon polymerization for biological applications / A.K. Nguyen, R.J. Narayan. Mater Today 20(6), 2017. - pp. 314–322.
37. Ren X. 3D gel-printing- an additive manufacturing method for producing complex shaped parts / X. Ren, H. Shao, T. Lin, H. Zheng. Mater Des 101, 2016. - P. 80–87.

38. Goh G.L. A low cost and flexible carbon nanotube pH sensor fabricated using aerosol jet technology for live cell applications / G. L. Goh, S. Agarwala, Y. J. Tan, W. Y. Yeong // Sensors Actuators BChem 260. 2018. - pp. 227–235.
39. Roschli A. Designing for big area additive manufacturing / A. Roschli, K. T. Gaul, A. M. Boulger, et al. // Addit. Manuf. 25, 2019. - pp. 275–285.
40. Enneti R.K. Sintering of WC-12%Co processed by binder jet 3D printing (BJ3DP) technology / R. K. Enneti, K. C. Prough, T. A. Wolfe, et al. // Int. J. Refract Met Hard Mater 71, 2018. - pp. 28–35.
41. Tang HH. Direct laser fusing to form ceramic parts. Rapid Prototyp J 8(5), 2002. - pp. 284–289.
42. Yin S. Cold spray additive manufacturing and repair: fundamentals and applications / S. Yin, P. Cavaliere, B. Aldwell, et al. // Addit Manuf 21, 2018. - pp. 628–650.
43. Janusziewicz R. Layerless fabrication with continuous liquid interface production / R. Janusziewicz, JR. Tumbleston, AL. Quintanilla, et al. // PNAS 11(42), 2016. - pp. 11703–11708.
44. Salonitis K. Stereolithography. Compr Mater Process. 10, 2014. - pp. 19–67.
45. Masood SH. Advances in fused deposition modeling. Compr Mater Process 10, 2014. - pp. 69–91.
46. Wang Z. Large scale deposition system by an industrial robot (I): design of fused pellet modeling system and extrusion process analysis / Z. Wang, R. Liu, T. Sparks, F. Liou // 3D. Print Addit Manuf 3(1), 2016. - pp. 39–47.
47. Tarasov S.Y. Microstructural evolution and chemical corrosion of electron beam wire-feed additively manufactured AISI 304 stainless steel / S.Y. Tarasov, A.V. Filippov, N.N. Shamarin, et al. // J Alloys Compd 803, 2019. - pp. 364–370.
48. Korner C. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting a review. Int Mater Rev 61(5), 2016. - pp. 361–377.
49. Kamraj A. Numerical study of localized electrochemical deposition for

micro electrochemical additive manufacturing / A. Kamraj, S. Lewis, M. Sundaram // Procedia CIRP 42, 2016. - pp. 788–792.

50. Brown R. Not just nylon - improving the range of materials for high speed sintering / R. Brown, C.T. Morgan, C.E. Majweski // In: SFF proceedings, 2018. - pp. 1487–1498.

51. Stringer J. Limits to feature size and resolution in ink-jet printing / J. Stringer, B. Derby // J Eur Ceram Soc 29, 2009. - pp. 913–918.

52. Yan Z. Review on thermal analysis in laser-based additive manufacturing / Z. Yan, W. Liu, Z. Tang, et al. // Opt Laser Technol 106, 2018. - pp. 427–441.

53. Jerby E. Incremental metal-powder solidification by localized microwave-heating and its potential for additive manufacturing / E. Jerby, Y. Meir, A. Salzberg, et al. // Addit Manuf 6., 2015. - pp. 53–66.

54. Holt N. Microheater array powder sintering: a novel additive manufacturing process / N. Holt, A.V. Horn, M. Montazeri, W. Zhou // J Manuf Process 31, 2018. - pp. 536–551.

55. Zuo H. Influence of interfacial bonding between metal droplets on tensile properties of 7075 Aluminum billets by additive manufacturing technique / H. Zuo, H. Li, L. Qi, S. Zhong // J Mater Sci Technol 32(5), 2016. - pp. 485–488.

56. Sillani F. Selective laser sintering and multi jet fusion: process-induced modification of the raw materials and analyses of parts performance / F. Sillani, R.G. Kleijnen, M. Vetterli, et al. // Addit Manuf 27, 2019. - pp. 32–41.

57. Feng Y. The double-wire feed and plasma arc additive manufacturing process for deposition in Cr-Ni stainless steel / Y. Feng, B. Zhan, J. He, K. Wang // J Mater Process Technol 259, 2018. pp. 206–215.

58. Boyle B.M. 3D printing using powder melt extrusion / B.M. Boyle, P.T. Xiong, T.E. Mensch, T.J. Werder, G.M. Miyake // Additive Manufacturing, 2019. - 100811.

59. Bryant FD. A study on effects of process parameters in rapid freeze prototyping / FD. Bryant, G. Sui, MC. Leu // Rapid Prototyp J 9(1), 2003. pp. 19–23.

60. Baumers M. Selective heat sintering versus laser sintering: comparison of deposition rate, process energy consumption and cost performance / M. Baumers, C. Tuck, R. Hague // In: SFF proceedings, 2015. - pp. 109–121.
61. Kumar S. Selective laser sintering - a qualitative and objective approach. JOM 55(10), 2003. - pp. 43–47.
62. Kumar S. Selective laser sintering/melting. Compr Mater Process 10, 2014. - pp. 93–134.
63. Scheithauer U. Droplet-based additive manufacturing of hard metal components by thermoplastic 3D printing (T3DP) / U. Scheithauer, J. Potschke, S. Weingarten, et al. // J Ceram Sci Technol 8(1), 2017. - pp. 155–160.
64. Tabernero I. Study on arc welding processes for high deposition rate additive manufacturing / I. Tabernero, A. Paskual, P. Alvarez, A. Suarez // Procedia CIRP 68, 2018. - pp. 358–362.
65. Bourell D. Materials for additive manufacturing / D. Bourell, J.P. Kruth, M. Leu, G. Levy, D. Rosen, A.M. Beese, A. Clare // CIRP Annals, 66(2), 2017. - pp. 659–681.
66. Khorasani A. A review of technological improvements in laser-based powder bed fusion of metal printers / A. Khorasani, I. Gibson, J.K. Veetil, A.H. Ghasemi // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 108(4), 2020. - pp. 191-209.
67. Стан і тенденції розвитку ринку 3D-технологій як елементу цифровізації виробництва продукції з полімерів і металів. Світогляд, 2021, №6 (92). – Режим доступу: <https://www.mao.kiev.ua/biblio/jscans/svitogliad/svit-2021-16-6/svit-6-2021-doroshenko-012.pdf>. – Дата звернення: 02.10.2022.
68. Технологичность конструкции изделия: Справочник / Ю.Д. Амиров, Т.К. Алферова, П.Н. Волков и др.; Под общ. ред. Ю.Д. Амирова. М.: Машиностроение, 1990. - 768 с.
69. Ипатов М.И. Экономика, организация и планирование технической подготовки производства / М.И. Ипатов, О.Г. Туровец // М.: Высшая школа. 1987. - 319 с.

70. Балабанов А.Н. Технологичность конструкций машин / А.Н. Балабанов. - М.: Машиностроение, 1987. - 336 с.
71. Войчинский А.М. Технологичность изделий в приборостроении / А.М. Войчинский, Э.Ж. Янсон // Л.: Машиностроение, 1988. - 232 с.
72. Радчун О.В. Разработка метода комплексной оценки производственной технологичности структуры изделия: Автореф. дис... канд. техн. наук. - Харьков: ХГПУ, 1999. - 20 с.
73. Витязев Ю.Б. Расширение технологических возможностей ускоренного формообразования способом стереолитографии: Дис... канд. техн. наук: 05.02.08. - Харьков, 2004. - 228 с.
74. Gupta S.K. Automated manufacturability analysis: A survey / S.K. Gupta, D. Das, W.C. Regli, D.S. Nau // Research in Engineering Design, 9(3), 1997. - pp. 168-190. doi: 10.1007/BF01596601.
75. Kumke M. A new methodological framework for design for additive manufacturing / M. Kumke, H. Watschke, T. Vietor // Virtual and physical prototyping. Vol. 11, Iss. 1, 2016, - pp. 3-19. doi: 10.1080/17452759.2016.1139377.
76. Кононюк А.Е. Обобщенная теория моделирования. Начала / А.Е. Кононюк. К.1.Ч.1 К.4: Освіта України, 2012. - 602 с.
77. Бахрушин В.Є. Математичні основи моделювання систем: Навчальний посібник для студентів / В.Є. Бахрушин. Запоріжжя: Класичний приватний університет, 2009. - 224 с.
78. ISO/ASTM 52915-16. Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF) Version 1.2, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. – Режим доступу: www.astm.org.
79. Gibson I. Software for Additive Manufacturing / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, M. Khorasani // In: Additive Manufacturing Technologies. Springer, Cham. 2021. - pp. 491-524. doi: 10.1007/978-3-030-56127-7_17.
80. WK48549. New Specification for AMF Support for Solid Modeling: Voxel Information, Constructive Solid Geometry Representations and Solid Texturing, ASTM International, West Conshohocken, 2016. – Режим доступу:

www.astm.org.

81. Doubrovski E.L. Voxel-based fabrication through material property mapping: A design method for bitmap printing / E.L. Doubrovski, E.Y. Tsai, D. Dikovsky, J.M.P. Geraedts, H. Herr, N. Oxman // Computer-Aided Design. 60, 2015, - pp. 3–13.
82. Shchurova E.I. A New File Format to Describe Fiber-reinforced Composite Workpiece Structure for Additive Technology Machines / E.I. Shchurova, A.V. Shchurova // Procedia Engineering, Vol. 129, 2015. - pp. 105-110. doi: 10.1016/j.proeng. 2015.12.016.
83. Bacciaglia A. A systematic review of voxelization method in additive manufacturing / A. Bacciaglia, A. Ceruti and A. Liverani // Mechanics & Industry, Vol. 20, Num. 630, 2019. - 19 p. doi: 10.1051/meca/2019058.
84. STL (file format). Wikipedia, the free encyclopedia. 2017. – Режим доступу: [https://en.wikipedia.org/wiki/STL_\(file_format\)](https://en.wikipedia.org/wiki/STL_(file_format)).
85. VRML. Wikipedia, the free encyclopedia. 2019. – Режим доступу: <https://en.wikipedia.org/wiki/VRML>.
86. Kruth J.P. Material Ingress Manufacturing by Rapid Prototyping Technologies / J.P. Kruth // CIRP Annals, Vol. 40, 2, 1991. - pp. 603-614.
87. Kochan D. Solid Freeform Manufacturing, Elsevier, Amsterdam, 1993, - p. 123.
88. Yan X. A review of rapid prototyping technologies and systems / X. Yan, P. Gu // Computer-Aided Design, 28(4), 1996. - pp. 307-318.
89. Chua C.K. A study of the state-of-the-art rapid prototyping technologies / C.K. Chua, S.M. Chou, T.S. Wong // The Int. J. of Adv. Manuf. Technol. Vol. 14. No. 2. 1998. - pp. 146-152.
90. Jacobs P.F., Rapid Prototyping and Manufacturing: Fundamentals of StereoLithography. McGraw-Hill, New York, NY, 1992. - 434 p.
91. Абдурайимов Л.Н. Повышение эффективности интегрированных технологий послойного выращивания изделий путем морфологического анализа их 3D образа на этапе подготовки к материализации: Дис. канд... техн.

наук: 05.02.08. - Харьков: НТУ "Харк. пол. ин-т.", 2012. - 264 с.

92. Gao W. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering / W. Gao, Y. Zhang, D. Ramanujan, K. Ramani, Y. Chen, C.B. Williams, C.C.L. Wang, Y.C. Shin, S. Zhang, P.D. Zavattieri // Computer-Aided Design, December 2015, Vol. 69. - P. 65-89.

93. Ranjan R. Design for manufacturability in additive manufacturing using a graph based approach / R. Ranjan, R. Samant, S. Anand // In: ASME 2015 International Manufacturing Science and Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2015. - pp. 1-10. doi: 10.1115/MSEC2015-9448.

94. Yang S. Additive manufacturing-enabled design theory and methodology: a critical review / S. Yang, Y.F. Zhao // International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 80(1-4), 2015. - pp. 327-342.

95. Vallhagen J. An approach for producibility and DFM-methodology in aerospace engine component development / J. Vallhagen, J. Madrid, R. Soderberg, K. Warmefjord // 2nd International Through-life Engineering Services Conference. Procedia CIRP 11, 2013. - p. 151-156. doi: 10.1016/j.procir.2013.07.035.

96. Boyle I. A review and analysis of current computer-aided fixture design approaches / I. Boyle, Y. Rong, D.C. Brown // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 27(1), 2011. - pp. 1–12.

97. Дружинский И.А. Сложные поверхности: Математическое описание и технологическое обеспечение: Справочник / И.А. Дружинский. Л.: Машиностроение, 1985. - 263 с.

98. Doubrovski Z. Optimal design for additive manufacturing: Opportunities and challenges / Z. Doubrovski // ASME 2011, - pp. 1-12.

99. Barnawal P. Design and evaluation of feedback system in design for manufacturability. Graduate Theses and Dissertations, 14789. 2015. - 90 p. – Режим доступу: <http://lib.dr.iastate.edu/etd/14789>.

100. Ponche R. A novel methodology of design for Additive Manufacturing applied to Additive Laser Manufacturing process / R. Ponche, O. Kerbrat, P. Mognol, J.-Y. Hascoet // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 30, 2014. - pp. 389-398.

101. Gunther P. Design for Manufacturing (DFM) – A case study of repetitive measures / P. Gunther, W. Frank // In Karwowski, Waldemar & Salvendy, G. (Eds.) Advances in Human Factors, Ergonomics, and Safety in Manufacturing and Service Industries. CRC Press, Boca Raton, 2010. - pp. 431-441.
102. Zhang Y. Evaluating the design for additive manufacturing: a process planning perspective / Y. Zhang, et al. // Procedia CIRP, 21, 2014. - pp. 144–150.
103. Ponche R. A new global approach to design for additive manufacturing / R. Ponche, J.-Y. Hascoet, O. Kerbrat, P. Mognol // Virtual and Physical Prototyping, Taylor & Francis, 2012, 7 (2), - pp.93-105.
104. Rosen D.W. Research supporting principles for design for additive manufacturing. Virtual and Physical Prototyping, 9 (4), 2014. - pp. 225-232.
105. Kuo T.C. Design for manufacture and design for 'X': concepts, applications, and perspectives / T.C. Kuo, S.H. Huang, H.C. Zhang // Computers and Industrial Engineering, 41 (3), 2001. - pp. 241-260.
106. Adam G.A.O. Design for additive manufacturing - element transitions and aggregated structures / G.A.O. Adam, D. Zimmer // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 7 (1), 2014. - p. 20-28. doi: 10.1016/j.cirpj.2013.10.001.
107. Hietikko E. Design for additive manufacturing – DFAM / E. Hietikko // The international journal of engineering and science (IJES). Vol. 3. Issue 12. December 2014. - p. 14-19.
108. Asadollahi-Yazdi E., Gardan J., Lafon P. Integrated design in additive manufacturing based on design for manufacturing / E. Asadollahi-Yazdi, J. Gardan, P. Lafon // International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering Vol:10, No:6, 2016. - p. 1115-1122.
109. Kulkarni P. A review of process planning techniques in layered manufacturing / P. Kulkarni, A. Marsan, D. Dutta // Rapid Prototyping Journal, 6(1), 2000. - pp. 18-35. doi: 10.1108/13552540010309859.
110. Algardh J. Thickness dependency of mechanical properties for thin-walled titanium parts manufactured by electron beam melting (EBM) / J. Algardh, T.

Horn, H. West, R. Aman, A. Snis, H. Engqvist, J. Lausmaa, O. Harrysson. Additive Manufacturing, Vol. 12, Part A, October 2016, - pp. 45-50. doi: 10.1016/j.addma.2016.06.009.

111. Zhu YY. The anisotropy of laser melting deposition additive manufacturing Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si titanium alloy / YY. Zhu, XJ. Tian, J. Li, HM. Wang. Materials & Design, 67, 2015. - pp. 538-542.

112. Гаращенко Я.Н. Современное оборудование и программное обеспечение обратного инжиниринга промышленных изделий / А.И. Грабченко, В.Л. Добросок, С.И. Чернышов, Я.Н. Гаращенко. Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. Вип. 5. Харків: НТУ «ХПІ», 2010. - С. 138-152.

113. Гаращенко Я.Н. Обратный инжиниринг промышленных изделий с использованием оптико-цифровой установки объемного сканирования Imetric Iscan / В.Л. Добросок, С.И. Чернышов, Я.Н. Гаращенко, Д.П. Сидорчук. Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. Вип. 4. Харків: НТУ «ХПІ», 2010. - С. 123-135.

114. Raigar J. A decision support system for the selection of an additive manufacturing process using a new hybrid MCDM technique / J. Raigar, V.S. Sharma, S. Srivastava, R. Chand, J. Singh // Sadhanā, 45(1), 2020.

115. Park H. S. A Decision Support System for Selecting Additive Manufacturing Technologies / H.S. Park, N.H. Tran // Proceedings of the 2017 International Conference on Information System and Data Mining - ICISDM'17. 2017. - pp. 151-155. doi: 10.1145/3077584.3077606.

116. Castillo-Rivera S. et al. Genetic algorithms for the scheduling in additive manufacturing. International Journal of Production Management and Engineering, V.8, N.2, - pp. 59-63, july 2020. – Режим доступу: <https://polipapers.upv.es/index.php/IJPME/article/view/12173>. Дата доступу: 26 жовтня 2020. doi: 10.4995/ijpme.2020.12173.

117. De Antón J., et al. Production planning in 3D printing factories. International Journal of Production Management and Engineering, V. 8, N. 2, - p. 75-

86, july 2020. – Режим доступу: <https://polipapers.upv.es/index.php/IJPME/article/view/12944>. - Дата доступу: 26 жовтня 2020. doi: 10.4995/ijpme.2020.12944.

118. Luo L. Chopper: Partitioning Models into 3D-Printable Parts / L. Luo, I. Baran, S.Rusinkiewicz, W. Matusik. ACM Transactions on Graphics (Proc. Siggraph Asia) 31(6), December 2012. – Режим доступу: http://gfx.cs.princeton.edu/pubs/Luo_2012_CPM/chopper.pdf.

119. Hu R. Approximate Pyramidal Shape Decomposition / R. Hu, H. Li, H. Zhang, D. Cohen-Or. A CMTrans on Graph 33, 6, 213: 1-213. 2014. - P. 12. – Режим доступу: https://www.cs.tau.ac.il/~dcor/articles/2014/approximate_pyramidal.pdf.

120. Vanek J. PackMerger: A 3D Print Volume Optimizer / J. Vanek, J. Garcia, B. Benes, R. Mech, N. Carr, O. Stava G. Miller. Computer Graphics Forum 33, 6. 2014. p. 322-332. doi: 10.1111/cgf.12353.

121. Пат. 105427374 Chine, МПК B33Y50/02; G06T17/00 / C. Xuelin; L. Lin; C. Baoquan. 3D (Three-dimensional) printing-oriented model decomposition and arrangement method. № CN20151762458; Заяв. 10.11.2015; Опубл. 23.03.2016, – Режим доступу: <https://www.google.com.ua/patents/CN105427374A?cl=en>.

122. Lohithaksha M.M. Part segregation based on particle swarm optimisation for assembly design in additive manufacturing / M.M. Lohithaksha, S. Sube, P. Vittal, T. Manoj Kumar // International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 32:7, 2019. - pp. 705-722. doi: 10.1080/0951192X.2019.1610577.

123. Oh Y. Part decomposition and assembly based (Re) design for additive manufacturing: A review / Y. Oh, C. Zhou, S. Behdad // Additive Manufacturing, 2010. doi: 10.1016/j.addma.2018.04.018.

124. Пат. 46418 У УКРАЇНА, МПК B29C 35/08, B29C 41/02, G06F 17/50. Спосіб пошарової побудови виробів на базі вихідної тріангуляційної 3D моделі / Добросок В.Л., Чернишов С.І., Вітязєв Ю.Б., Абдурайімов Л.Н.; заявник і патентовласник Нац. техн. ун-т "Харківський політехн. ін-т". № u200905500; заявл. 01.06.2009; опубл. 25.12.2009, Бюл. № 24.

125. Пат. 54398 У УКРАЇНА, МПК B29C 35/08, B29C 41/02, G06F 17/50, G06F 19/00. Спосіб пошарової побудови виробів на базі вихідної тріангуляційної 3D моделі / Абдурайімов Л.Н., Чернишов С.І., Добросок В.Л., Вітязєв Ю.Б.; заявник і патентовласник Нац. техн. ун-т "Харківський політехн. ін-т". - № u201004548; заявл. 19.04.2010; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 21.

126. Cheng B. Stress and deformation evaluations of scanning strategy effect in selective laser melting / Bo Cheng, Subin Shrestha, Kevin Chou. Additive Manufacturing, Available online 21 May 2016. doi: 10.1016/j.addma.2016.05.007.

127. Guessasma S. Challenges of additive manufacturing technologies from an optimisation perspective / S. Guessasma, W. Zhang, J. Zhu, S. Belhabib, H. Nouri. Int. J. Simul. Multisci. Des. Optim., 2015, 6, A9. – Режим доступу: http://www.ijsmdo.org/articles/smdo/full_html/2015/01/smdo150009/smdo150009.html.

128. Wimpenny D.I. Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies / D.I. Wimpenny, P.M. Pandey, L.J. Kumar // Springer Science+Business Media Singapore, 2016. - 195 p.

129. Parry L. Understanding the effect of laser scan strategy on residual stress in selective laser melting through thermo-mechanical simulation / L. Parry, I.A. Ashcroft, R.D. Wildman. Additive Manufacturing, Vol. 12, Part A, October 2016. - pp. 1-15. – Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2016.05.014>.

130. Yadroitsev I. Strategy of manufacturing components with designed internal structure by selective laser melting of metallic / I. Yadroitsev, L. Thivillon, Ph. Bertrand, I. Smurov // Applied Surface Science 254, 2007, - pp. 980–983. doi: 10.1016/j.apsusc.2007.08.046.

131. Пат. EP 1419836, МПК B29C67/00, B22F3/16, B22F3/105, B23K26/34 / Frank Herzog. Process for preparing a workpiece, particularly through powder stereolithography or sintering - № EP20020024817; Заяв. 07.11.2002; Опубл. 19.05.2004. – Режим доступу: <https://www.google.com.ua/patents/EP1419836A1>.

132. Пат. 8187521 США, МПК H01J37/30 / Morgan Larsson, Vastra

Frolunda; Anders Snis, Uddevalla (SE). Method and device for producing three-dimensional objects № 12/309849; Заяв. 27.07.2006; Опубл. 29.05.2012. – Режим доступу: <https://www.google.com.ua/patents/US8187521>.

133. Weber S. Parameters on support structure design for metal additive manufacturing / S. Weber, J. Montero, M. Bleckmann, K. Paetzold // Proceedings of the Design Society: Design Conference, 1, 2020. - pp. 1145–1154. doi: 10.1017/dsd.2020.14.

134. Jiang J. Effect of support on printed properties in fused deposition modelling processes / J. Jiang, J. Lou, G. Hu // Virtual and Physical Prototyping, 2019. - pp. 1–8. doi: 10.1080/17452759.2019.1568835.

135. Jiang J. Investigation of printable threshold overhang angle in extrusion-based additive manufacturing for reducing support waste / J. Jiang, J. Stringer, X. Xu, R.Y. Zhong // International journal of computer integrated manufacturing, 31(10), 2018. - pp. 961–969. doi: 10.1080/0951192x.2018.1466398.

136. Yuchu Q. Automatic generation of alternative build orientations for laser powder bed fusion based on facet clustering / Q. Yuchu, Q. Qunfen, S. Peizhi, J.S. Paul, J. Xiangqian // Virtual and Physical Prototyping 15(3), 2020. - pp. 307–324, doi: 10.1080/17452759.2020.1756086.

137. Lan P. Determining fabrication orientations for rapid prototyping with Stereolithography apparatus / P. Lan, S. Chou, L. Chen, D. Gemmill // Computer-Aided Design, Vol. 29, Issue 1, 1997. - pp. 53-62. doi: 10.1016/S0010-4485(96)00049-8.

138. Singhal S.K. Optimum part deposition orientation in stereolithography / S.K. Singhal, A.P. Pandey, P.M. Pandey, A.K. Nagpal // Computer-Aided Design & Applications. Vol. 2. Nos. 1-4. 2005. - pp. 319-328. doi: 10.1080/16864360.2005.10738380.

139. Marsan A. A survey of process planning techniques for layered manufacturing / A. Marsan, D. Dutta // Proceedings of DETC'97, 1997 ASME Design Engineering Technical Conferences, Sacramento, CA, September 1997.

140. Bablani M. Quantification of errors in rapid prototyping processes, and

determination of preferred orientation of parts / M. Bablani, A. Bagchi // Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of the SME, Vol. XXIII, SME, Houghton, MI, May 1995. - pp. 319-324.

141. Thompson D.C. Optimizing part quality with orientation / D.C. Thompson, R.H. Crawford // Proc. of the Solid Freeform Fabrication Symposium. Vol. 6. 1995. - pp. 362-368.

142. Wodziak J.R. A genetic algorithm for optimizing multiple part placement to reduce build time / J.R. Wodziak, G.M. Fadel, C. Kirschman // in Chartoff, R.P., Lightman, A.J. and Schenk, J.A. (Eds), Proceedings of the 5th International Conference on Rapid Prototyping, University of Dayton, June 1994, - pp. 201-210.

143. Beascoechea A. On three-dimensional heuristic packing for solid freeform fabrication / A. Beascoechea, M.J. Wozny // Solid Freeform Fabrication Symposium 1995, University of Texas, Austin, August 1995. - pp. 326-341. – Режим доступу: <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/69341>.

144. Cheng W. Multi-objective optimization of part-building orientation in stereolithography / W. Cheng, J.Y.H. Fuh, A.Y.C. Nee, Y.S. Wong, H.T. Loh, T. Miyazawa // Rapid Prototyping J. Vol. 1. No. 4. 1995. - P. 12-23. doi: 10.1108/13552549510104429.

145. Canellidis V. Genetic-algorithm-based multi-objective optimization of the build orientation in stereolithography / V. Canellidis, J. Giannatsis, V. Dedoussis // Int J Adv Manuf Technol, 45. 2009. - pp. 714–730. doi: 10.1007/s00170-009-2006-y.

146. Jiang J. Optimization of process planning for reducing material waste in extrusion based additive manufacturing / J. Jiang, X. Xu, J. Stringer // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 59, 2019. - pp. 317–325. doi: 10.1016/j.rcim.2019.05.007.

147. Jiang J. Optimisation of multi-part production in additive manufacturing for reducing support waste / J. Jiang, X. Xu, J. Stringer // Virtual and Physical Prototyping, 2019. doi: 10.1080/17452759.2019.1585555.

148. Jiang J. Support Structures for Additive Manufacturing: A Review / J. Jiang, X. Xu, J. Stringer // Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2(4), 2018. 64. doi: 10.3390/jmmp2040064.
149. Kirschman C.F. Computer aided design of support structures for stereolithographic components / C.F. Kirschman, C.C. Jara-Almonte, A. Bagchi, R.L. Dooley, A.A. Ogale // Proceedings of the 1991 ASME Computers in Engineering Conference, Santa Clara, CA, August 1991. - pp. 443-458.
150. Swaelens B. Support generation for rapid prototyping / B. Swaelens, J. Pauwels, W. Vancraen // in Chartoff R.P. and Lightman A.J. (Eds), Proceedings of the 6th International Conference on Rapid Prototyping, University of Dayton, June 1995. - pp. 115-121.
151. Allen S. Determination and evaluation of support structures in layered manufacturing / S. Allen, D. Dutta // Journal of Design and Manufacturing, Vol. 5, 1995. - pp. 153-162.
152. Chalasani K. Support generation for fused deposition modeling / K. Chalasani, L. Jones, L. Roscoe // Solid Freeform Fabrication Symposium 1995, University of Texas, Austin, August 1995. - pp. 229-241.
153. Otto H.E. Extension of feature-based CAD systems using TAE structures to support integrated rapid prototyping / H.E. Otto, F. Kimura, F. Mandorli, U. Cugini // Proceedings of the Computers in Engineering Conference and the Engineering Database Symposium, ASME, 1995. - pp. 779-793.
154. Allen S. Wall thickness control in layered manufacturing / S. Allen, D. Dutta // Proceedings of the 13th Annual ACM Symposium on Computational Geometry, Nice, France, 1997. - pp. 240-247.
155. Jiang J. Support Optimization for Flat Features via Path Planning in Additive Manufacturing. 3D Printing and Additive Manufacturing. 2018. doi: 10.1089/3dp.2017.0124.
156. Jiang J. Effect of support on printed properties in fused deposition modelling processes / J. Jiang, J. Lou, G. Hu // Virtual and Physical Prototyping, 2019. - pp. 1–8. doi: 10.1080/17452759.2019.1568835.

157. Пат. 4863538 США, МПК B 27 N 3/00, B 32 B 31/00, B 23 K 9/00, B 29 C 67/00. Method and apparatus for producing parts by selective sintering / Carl R. Deckard; Board of Regents, The University of Texas System. - №920580; filed 17.10.1986; date of print 05.09.1989. – Режим доступу: <https://www.google.com.ua/patents/US4863538>.

158. Rock S.J. Utilizing topological information to increase scan vector generation efficiency / S.J. Rock, M.J. Wozny // Solid Freeform Fabrication Symposium Proc. (August 12-14). Austin (Texas). 1991. - pp. 28-36.

159. Chalasani K.L. An algorithm to slice 3D shapes for reconstruction in prototyping systems / K.L. Chalasani, B.N. Grogan, A. Bagchi, C.C. Jara-Almonte, A.A. Ogale, R.L. Dooley // Proceedings of the 1991 ASME Computers in Engineering Conference, August 1991. - pp. 209-216.

160. Kirschman C.F. A parallel slicing algorithm for solid freeform fabrication processes / C.F. Kirschman, C.C. Jara-Almonte // Solid Freeform Fabrication Symposium 1992, University of Texas, Austin, August 1992. - pp. 26-33.

161. Dolenc A. Slicing procedures for layered manufacturing techniques / A. Dolenc, I. Makela. Computer-Aided Design, Vol. 26 No. 2, 1994. - pp. 119-126.

162. Sabourin E. Adaptive slicing using stepwise uniform refinement / E. Sabourin, S.A. Houser, J.H. Bohn // Rapid Prototyping Journal, Vol. 2 No. 4, 1996. - pp. 20-26.

163. Chen X. Direct slicing from PowerSHAPE models for Rapid Prototyping / X. Chen, C. Wang, X. Ye and other // The Int. J. of Adv. Manuf. Technol. 2001. Vol. 17. No. 7. - pp. 543-547.

164. Sun S.H. Adaptive direct slicing of a commercial CAD model for use in rapid prototyping / S.H. Sun, H.W. Chiang, M.I. Lee // The Int. J. of Adv. Manuf. Technol. 2007. Vol. 34. Nos. 7-8. - pp. 689-701.

165. Jamieson R. Direct slicing of CAD models for rapid prototyping / R. Jamieson, H. Hacker // Rapid Prototyping Journal, Vol. 1 No. 2, 1995. - pp. 4-12.

166. Kulkarni P. Adaptive slicing of parametrizable algebraic surfaces for layered manufacturing / P. Kulkarni, D. Dutta // Proceedings of the ASME Design

Engineering Technical Conferences, Vol. 1, 1995, - pp. 211-217.

167. Cao W. Direct slicing from AutoCAD solid models for rapid prototyping / W. Cao, Y. Miyamoto. The Int. J. of Adv. Manuf. Technol. 2003. Vol. 21. Nos. 10-11. - pp. 739–742.

168. Zhou M.Y. Adaptive direct slicing with non-uniform cusp heights for rapid prototyping / M.Y. Zhou, J.T. Xi, J.Q. Yan. The Int. J. of Adv. Manuf. Technol. 2004. Vol. 23. Nos. 1-2. - pp. 20-27.

169. Farouki R.T. Computational methods for rapid prototyping of analytic solid models / R.T. Farouki, T. Konig. Rapid Prototyping Journal, Vol. 2 No. 3. 1996. - pp. 41-49.

170. Chang W.R. CAD/CAM for the Selective Laser Sintering Process, MS Thesis, University of Texas, Austin, TX, 1989.

171. Chari J.K. Robust prototyping / Chari J.K., Hall J.L. // Solid Freeform Fabrication Symposium 1993, University of Texas, Austin, August 1993. - pp. 135-142.

172. Пат. 20020015654 США, МПК G05B19/4062, C23C26/02, B23K26/34, B22F3/105 / Suman Das, Ann Arbor, MI (US); Direct selective laser sintering of metals - № 09/873,055; Заяв. 01.06.2001; Опубл. 07.02.2002. – Режим доступу: <https://www.google.com.ua/patents/US20020015654>.

173. Farouki R.T. Offset curves in layered manufacturing / R.T. Farouki, K. Tarabanis, J.U. Korein, J.S. Batchelder, S.R. Abrams // Proceedings of the 1994 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, PED, Vol. 68 No. 2, 1994. - pp. 557-567.

174. Coquillart S. Computing offsets of B-spline curves. Computer-Aided Design, Vol. 19, No. 6, July/August 1987. - pp. 305-309.

175. Chen C.C. Predicting total buildtime and the resultant cure depth of the 3D stereolithography process / C.C. Chen, P.A. Sullivan // Chen, Rapid Prototyping Journal, Vol. 2 No. 4, 1996. - pp. 27-40.

176. Ullett J.S. Reducing warpage in stereolithography through novel draw styles, in Marcus, H.L. et al. (Eds) / J.S. Ullett, R.P. Chartoff, A.J. Lightman,

J.P. Murphy, J. Li // Solid Freeform Fabrication Symposium 1994, University of Texas, Austin, August 1994. - pp. 242-249.

177. Badrinarayan B. Effect of processing parameters in SLS of metal-polymer powders / B. Badrinarayan, J.W. Barlow // Solid Freeform Fabrication Symposium 1995, University of Texas, Austin, August 1995, - pp. 55-63.

178. Feldman L.A. Mechanical testing of laser-cured photopolymers for multiple-layer structures / L.A. Feldman // Journal of Materials Science Letters, Vol. 11, 1992. - pp. 1231-1233.

179. Yardimci A.M. Conceptual framework for the thermal process modeling of fused deposition / A.M. Yardimci, S.I. Guceri. Rapid Prototyping Journal, Vol. 2, No. 2, 1996.

180. Hope R.L. Rapid prototyping with sloping surfaces / R.L. Hope, P.A. Jacobs, R.N. Roth // Rapid Prototyping Journal, Vol. 3 No. 1, 1997. - pp. 12-19.

181. Khoshnevis B. Quantum leap in rapid prototyping unveiled / B. Khoshnevis // US-Tech, June-July 1997.

182. Kulkarni P. On the integration of layered manufacturing and material removal processes / P. Kulkarni, D. Dutta // Submitted to the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1998. - pp. 100-108.

183. Jiang J. Path Planning Strategies to Optimize Accuracy, Quality, Build Time and Material Use in Additive Manufacturing: A Review / J. Jiang, Y. Ma // Micromachines, 11(7), 2020. – 633. doi: 10.3390/mi11070633.

184. Jackson T. Modeling and designing components with locally controlled composition / T. Jackson, N. Patrikalakis, E. Sachs // Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, The University of Texas, Austin, August 10-12, 1998.

185. Pinilla J.M. Process planning and automation for additive-subtractive solid freeform fabrication / J.M. Pinilla, J.-H. Kao, F. Prinz // Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, The University of Texas, Austin, August 10-12, 1998.

186. Asthana A. Introducing ML.NET: Cross-platform, Proven and Open

Source Machine Learning Framework [Електронний ресурс]. 2017-05-07. – Режим доступу: blogs.msdn.microsoft.com. – Дата звернення: 23.05.2018.

187. Object-Oriented Analysis and Design with Applications / G. Booch, R.A. Maksimchuk, M.W. Engle, B.J. Young, J. Conallen, K.A. Houston. Addison-Wesley Professional; 3rd edition, 2007. - 720 p.

188. Blaschek G. Object-oriented programming: with prototypes. Springer Science & Business Media, 2012.

189. Strasser W. Geometric modeling: Theory and practice: The state of the art. / W. Strasser, R. Klein, R. Rau. 2012.

190. Руководство по эксплуатации установки избирательного лазерного сканирования SLS Vanguard Si2. 3D Systems, 2001. - 58 с.

191. Инструкция по настройке и поверке оптико-цифровой системи объемного сканирования Imetric Iscan II. Цюрих: Imetric, 2001. - 82 с.

192. ImetricS Software manual. Porrentruy: Imetric SA, 2002. - 83 с.

193. IScan System manual. Porrentruy: Imetric SA, 2003. - 24 с.

194. Офіційний сайт компанії розробника програмного забезпечення Geomagic [Електронний ресурс]. 2013. – Режим доступу: <http://www.geomagic.com/en/products/studio/overview>. – Дата звернення: 24.05.2018.

195. Materials Support. Сайт 3D systems, 2017. – Режим доступу: <https://www.3dsystems.com/support/materials/sds>. – Дата звернення: 24.05.2018.

196. Lee K. Principles of CAD/CAM/CAE systems. 1999.

197. Magics [Електронний ресурс]. Офіційний веб-сайт компанії Materialise, Бельгія. 2017. – Режим доступу: <http://www.materialise.com/en/software/magics-21>. – Дата звернення: 24.05.2018.

198. Добросок В.Л. Морфологический анализ триангуляционных моделей промышленных изделий / В.Л. Добросок, В.А. Фадеев, Я.Н. Гаращенко [и др.] // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. - Харьков: НТУ "ХПИ", 2011. Вып. 79. - С. 52-63.

199. Zhang Y. A new decision support method for the selection of RP

process: knowledge value measuring / Y. Zhang, Y. Xu, A. Bernard. Int J Comp Integ M. 2013; ahead-of-print. - pp. 1-12.

200. Kerbrat O. Manufacturing complexity evaluation at the design stage for both machining and layered manufacturing / O. Kerbrat, P. Mognol, J. Hascoet. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2010. - pp. 208-215.

201. Cohen J. Two algorithms for determining volumes of convex polyhedra / J. Cohen, T. Hickey // Journal of the ACM (JACM), 1979, 26.3. - pp. 401-414.

202. Вигодський М.Я. Довідник з елементарної математики. - К.: Держтехвидав УРСР, 1954.

203. Боркун А.І. Використання функціонально-вартісного аналізу для підвищення ефективності виготовлення виробів / А.І. Боркун, В.О. Занора // Вісник, 9, 2011. - С. 62-67.

204. Марець О. Р. Теоретичні питання побудови інтегральних індикаторів (Theoretical issues of integral indicators calculating) / О. Р. Марець, О. М. Вільчинська // Глобальні та національні проблеми економіки, 9, 2016. - С. 1045-1048.

205. Грінберг Г.Л. Експертно-статистичний метод побудови інтегральних індикаторів соціальних і техніко-економічних систем / Г.Л. Грінберг, Є.Є. Водовозова // Міжнародний науковий журнал «Грааль науки», 4, 2021. - С. 285-289 doi: 10.36074/grail-of-science.07.05.2021.051.

206. Вища математика: Підручник / Домбровський В.А., Крижанівський І.М., Мацьків Р.С., Мигович Ф.М., Неміш В.М., Окрепкій Б.С., Хома Г.П., Шелестовська М.Я.; за редакцією Шинкарика М.І. - Тернопіль: Видавництво Карп'юка, 2003. - 480 с.

207. Garashchenko Y.N. The morphological analysis of 3D models of industrial products / A.I. Grabchenko, V.L. Dobroskok, S.I. Tchernyshov, Y.N. Garashchenko. The Publications of the XXVI. microCAD International Scientific Conference 29-30 March 2012 [Електрон. ресурс: електрон. текст. і граф. дані (150985 Кб). – 1 електрон. оптич. диск (CD-ROM). – ISBN 978-963-661-773-8]. – Miskolc: University of Miskolc [Угорщина], 2012.

208. Dobroskok V.L. Improving the accuracy of products in their building by selective laser sintering using compensating deformations of initial triangulated models / V.L. Dobroskok, A.V. Pogarsky, Y.N. Garashchenko // The Publications of the Multi Science - XXX. MicroCAD International Multidisciplinary Scientific Conference University of Miskolc, 21-22 April, 2016. - Miskolc: University of Miskolc [Угорщина], 2016. – 6 р.

209. Grabchenko A.I. Integral characteristics of triangulation 3D models of products / A.I. Grabchenko, V.L. Dobroskok, Y.N. Garashchenko, L.N. Abdurajimov // Key Engineering Materials. Switzerland, 2014. Vol. 581 (Precision Machining VII). Р. 281-286.

210. Мюллер П. Таблицы по математической статистике / П. Мюллер, П. Нойман, Р. Шторм. - Пер. с нем. М.: Финансы и статистика, 1982. - 278 с.

211. Гаращенко Я.Н. Оценка технологичности конструкции изделий, получаемых с помощью аддитивных технологий / Я.Н. Гаращенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. - Х.: НТУ «ХПІ», 2017. № 26 (1248). - С. 44–50.

212. Пат. UA 117760 У УКРАЇНА, МПК B29C 35/08, B29C 41/02, G06F 17/50, G06F 19/00 / В.Л. Добросок, Я.М Гаращенко (UA); НТУ "ХПІ". Спосіб пошарової побудови виробів на базі структурної декомпозиції вихідної тріангуляційної 3D моделі - № u201700062 Заяв. 03.01.2017; Опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13. - 6 с.

213. Гаращенко Я.Н. Оценка исходной 3D-модели на приспособленность к определению рациональной ориентации изделия при послойном построении / Я.Н. Гаращенко // Резание и инструмент в технологических системах, 2017, Вып. 87. - С. 28-40.

214. Витязев Ю.Б. Рациональная ориентация изделия при его послойном формообразовании на основе статистического анализа исходной триангуляционной 3D модели / Ю. Б. Витязев, Я. Н. Гаращенко // Резание и инструменты в технологических системах. - Харьков: НТУ «ХПИ», 2018. Вып. 88. С. 18-31.

215. Гаращенко Я.М. Адаптивне пошарове розділення 3D моделі виробу в адитивних технологіях / Я.М. Гаращенко // Вісник ЖДТУ. 2018. № 1 (81). - С. 17-24. doi: 10.26642/tn-2018-1(81)-17-24.

216. Пат. UA 117759 У УКРАЇНА, МПК B29C 35/08, B29C 41/02, G06F 17/50, G06F 19/00 / В.Л. Добросок, Я.М Гаращенко (UA); НТУ "ХПІ". Спосіб пошарової побудови виробів з використанням лазерного джерела тепла на базі тріангуляційної 3D моделі - № u201700060 Заяв. 03.01.2017; Опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13. - 5 с.

217. Пат. UA 117768 У УКРАЇНА, МПК B29C 35/08, B29C 41/02, G06F 19/00, H01J 37/30 / В.Л. Добросок, Я.М Гаращенко (UA); НТУ "ХПІ". Спосіб пошарової побудови виробів на базі тріангуляційної 3D моделі за заданою стратегією обробки лазерним промінням - № u201700075 Заяв. 03.01.2017; Опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13. - 3 с.

218. Пат. UA 117777 У УКРАЇНА, МПК G06F 17/50, G06F 19/00, B29C 35/08, H01J 37/30 / В.Л. Добросок, Я.М Гаращенко (UA); НТУ "ХПІ". Спосіб пошарової побудови виробів на базі тріангуляційної 3D моделі за багатопрохідною стратегією обробки лазерним промінням - № u201700138 Заяв. 03.01.2017; Опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13. - 3 с.

219. Baumers M. Economic aspects of additive manufacturing: benefits, costs and energy consumption. A Doctoral Thesis. Submitted in partial fulfillment of the requirements for the award of Doctor of Philosophy of Loughborough University. 2012. - 266 p. – Режим доступу: <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/10768>. – Дата звернення: 14.03.2019.

220. Хлевний А. О. Моделі, метод та інформаційна технологія управління технологічною підготовкою виробництва машинобудівних підприємств: дис... канд. техн. наук: 05.13.06. Київ, 2015. - 208 с. – Режим доступу: <https://dspace.nau.edu.ua/bitstream/NAU/16184/1/Disert.pdf>.

221. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В. А. Вознесенский. - М.: Финансы и статистика, 1981. - 263 с.

222. Krivoshapko S.N. Encyclopedia of Analytical Surfaces / S.N. Krivoshapko, V.N. Ivanov. Springer, 2015. - 781 p.
223. Wood H.L. An overview of complexity theory and its application to the construction industry / H.L. Wood, K. Gidado // In: 24th Annual ARCOM Conference. Cardiff, UK, Association of Researchers in Construction Management. 2008. - pp. 677-686.
224. Ilinkin I. A decomposition-based approach to layered manufacturing / I. Ilinkin, R. Janardan, J. Majhi, J. Schwerdt, M. Smid, R. Sriram // Proceedings of the Seventh International Workshop on Algorithms and Data Structures, Providence, RI, 8–10 August 2001, LNCS 2125, - pp. 389–400., Computational Geometry, Vol. 23, I. 2, 2002, - P. 117-151. doi: 10.1016/S0925-7721(01)00059-1.
225. Sung-Min H. Determination of fabricating orientation and packing in SLS process / H. Sung-Min, C. Kyung-Hyun, L. Seok-Hee, C. Pok-Keun // Journal of Materials Processing Technology. 2001. Vol. 112, Issues 2–3. - P. 236-243. doi: 10.1016/S0924-0136(01)00581-7.
226. Han G.C. New approach for nesting problem using part decomposition technology / G. C. Han, S. K. Kim // IEEE Xplore Conference: Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1997. IECON 97. 23rd International Conference on, Vol. 3, 1997. doi: 10.1109/IECON.1997.668471.
227. Weidong Y. A Genetic Algorithm for Automatic Packing in Rapid Prototyping Processes / Y. Weidong, L. Weiling, L. Libing, X. Anping // Advanced Intelligent Computing Theories and Applications. With Aspects of Theoretical and Methodological Issues: 4th International Conference on Intelligent Computing, ICIC 2008 Shanghai, China, September 15-18, 2008. - pp. 1072-1077.
228. Гаращенко Я. Оценка геометрической сложности изделий на основе анализа зависимости количества граней триангуляционных моделей от допустимого двугранного угла между смежными гранями / В. Добросок, Я. Гаращенко // Българско списание за инженерно проектиране. Издател: Машиностроителен факултет, Технически университет-София, 2017 (31). - С. 63-71. - Режим доступу: [http://bjed.tu-sofia.bg/items/BJED-0031\(2017\).pdf](http://bjed.tu-sofia.bg/items/BJED-0031(2017).pdf).

229. Zhang Y. A KBE CAPP framework for qualified additive manufacturing / Y. Zhang, A. Bernard // CIRP Annals - Manufacturing Technology. Vol. 67, Issue 1, 2018, - P. 467-470. doi: 10.1016/j.cirp.2018.04.045.
230. Мельничук П.П. Технологія машинобудування / П.П. Мельничук, А.І. Боровик, П.А. Лінчевський. Житомирський державний технологічний університет, 2005. - 876 с. - Режим доступу: <http://eztuir.ztu.edu.ua/123456789/6545>.
231. Leo Kumar S.P. Knowledge-based expert system in manufacturing planning: state-of-the-art review / S.P. Leo Kumar // International Journal of Production Research. 2018. doi: 10.1080/00207543.2018.1424372.
232. Russell S. J. Artificial Intelligence: A Modern Approach / S. J. Russell, P. Norvig (2nd ed.). Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall. 2003.
233. Luger G. Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving / G. Luger, W. Stubblefield. (5th ed.), The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc. 2004. - P. 720.
234. Patten M.L. Understanding research methods: An overview of the essentials / M.L. Patten, M. Newhart. Routledge, 2017.
235. Гаращенко Я. М. Методи наукових досліджень: Навч. посібник / А. І. Грабченко, В. О. Федорович, Я. М. Гаращенко. - Х.: НТУ "ХПІ", 2009. - 142 с. - Режим доступу: http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/5823/1/Hrabchenko_Metody_naukovykh_2009.pdf.
236. Chen Ding-Geng. Monte-Carlo simulation-based statistical modeling / Ding-Geng Chen, John Dean Chen. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer, 2017. - 430 p. doi: 10.1007/978-981-10-3307-0.
237. Ozdemir S. Principles of data science. Packt Publishing Ltd, 2016. - 389 p.
238. Кононюк А. Ю. Нейроні мережі і генетичні алгоритми / А. Ю. Кононюк. К.: «Корнійчук», 2008. - 446 с.
239. Вороновский Г.К. Генетичні алгоритми, штучні нейроні мережі і проблеми віртуальної реальності / Г.К. Вороновский, К.В. Махотило, С.Н.

Петрашев, С.А. Сергеев. Замовне. - Х.: Основа, 1997. - 112 с.

240. Bäck T. An overview of evolutionary algorithms for parameter optimization / T. Bäck, H. - P. Schwefel // Evolutionary computation, 1.1. 1993. - P. 1-23.

241. Программирование с экспрессией генов: способы кодирования и создания синтаксических деревьев / О.Г. Руденко, С.В. Мирошниченко, А.А. Бессонов. Управляющие системы и машины. 2015. № 3. - С. 82–92.

242. Beyer H.-G. Evolution Strategies: A Comprehensive Introduction / H.-G. Beyer, H.-P. Schwefel // Journal Natural Computing, 1(1). - P. 3–52. 2002.

243. Kroese D.P. Handbook of Monte Carlo Methods / D.P. Kroese, T. Taimre, Z.I. Botev. John Wiley & Sons, 2013. - 772 p.

244. Holland J.H. Adaptation in natural and artificial systems. University of Michigan Press, Ann Arbor. 1975.

245. Simon D. Evolutionary optimization algorithms. J. Wiley & Sons, 2013. - 741 p.

246. Ротштейн О.П. Моделювання та оптимізація надійності багатовимірних алгоритмічних процесів / О.П. Ротштейн, С.Д. Штовба, О.М. Козачко. Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2007. - 211 с.

247. Gogate A. Intelligent layout planning for rapid prototyping / A. Gogate, S.S. Pande // Int J Prod Res. 2008. 46(20). - P. 5607-5631.

248. Yu E.A. Evolutionary decomposition for 3D printing / E.A. Yu, J. Yeom, C.C. Tutum, E. Vouga, R. Miikkulainen. In Proceedings of GECCO'17, Berlin, Germany, July 15-19. 2017. - P. 1272-1279.

249. Shamir A. A survey on mesh segmentation techniques. Computer Graphics. Forum 27, 6. 2008. - P. 1539-1556.

250. Hao J. An efficient curvature-based partitioning of large-scale STL models / J. Hao, L. Fang, R. Williams. Rapid Prototyping Journal. 2011. 17, 2. - P. 116-127.

251. Xuelin C. et al. Dapper: decompose-and-pack for 3D printing. Acm transactions on graphics. Vol. 34, no. 6, 4. 2015. - 12 p.

252. Zhang Y. AM feature and knowledge based process planning for additive manufacturing in multiple parts production context / Y. Zhang, A. Bernard // In Proceedings of 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, 2014. - P. 1259-1276.

253. ISO/ASTM 52910:2017 (E). Standard Guidelines for Design for Additive Manufacturing. Jan. 8, 2017. Published: March 2017. - 14 p.

254. Di Angelo L. A reliable build orientation optimization method in additive manufacturing: the application to FDM technology / L. Di Angelo, P. Di Stefano, A. Dolatnezhadsomarin, E. Guardiani, E. Khorram // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. - 14 p. doi: 10.1007/s00170-020-05359-x.

255. Byun H.S. Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing / H.S. Byun, K.H. Lee // Int J Adv Manuf Technol, 2006. 28: - p. 307–313. doi: 10.1007/s00170-004-2355-5.

256. Alexander P. Part orientation and build cost determination in layered manufacturing / P. Alexander, S. Allen, D. Dutta // Computer-Aided Design, Vol. 30, Issue 5, 1998, - pp. 343-356. doi: 10.1016/S0010-4485(97)00083-3.

257. Byun H.S. Optimal part orientation of rapid prototyping using a genetic algorithm / Hong S. Byun, Kwan H. Lee. Proc. of the 34th Int. Conf. on Computers & Industrial Engineering. 2004. - P. 426-431.

258. Hur J. The development of a CAD environment to determine the preferred build-up direction for layered manufacturing / J. Hur, K. Lee. The Int. J. of Adv. Manuf. Technol. 1998. № 14. - pp. 247-254. doi:10.1007/BF01199879.

259. Massod S.H. A generic algorithm for part orientation system for complex parts in rapid prototyping / S.H. Massod, W. Rattanawong, P. Iovenitti. J. Mater. Process. Technol. 2003. Vol. 139. 1-3. - pp. 110-116. doi: 10.1016/S0924-0136(03)00190-0.

260. Pandey P.M. Optimal part deposition orientation in FDM by using a multi-criteria Genetic Algorithm / P.M. Pandey, K. Thrimurtullu, N.V. Reddy. Int. J. of Production Research. 2004. Vol. 42. No. 19. - P. 4069-4089.

261. Gupta S.K. Finding near-optimal build orientations for shape deposition manufacturing / S.K. Gupta, Q. Tian, L.E. Weiss. Proceedings of the IFIP TC5 WG5.3 Int. Conf. on Sculptured Surface Machining. 1998. Vol. 146. - P. 208-216.
262. Thrimurtullu K. Optimal part deposition orientation in fused deposition modeling / K. Thrimurtullu, P.M. Pandey, N.V. Reddy // Int. J. of Machine Tools and Manufacture. 2003. Vol. 44. No. 6. - P. 585-594. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2003.12.004.
263. Xu F. Optimal orientation with variable slicing in stereolithography / F. Xu, Y. Wong, H. Loh, J. Fuh, T. Miyawaza // Rapid Prototyping Journal 1997; 3(3): - pp. 76-88. doi: 10.1108/13552549710185644.
264. Das P. Optimum Part Build Orientation in Additive Manufacturing for Minimizing Part Errors and Support Structures / P. Das, R. Chandran, R. Samant, S. Anand. Procedia Manufacturing, Vol. 1, 2015. - pp. 343-354. doi: 10.1016/j.promfg.2015.09.041.
265. Добросок В.Л. Рациональная ориентация изделий при их послойном формообразовании на базе исходной триангуляционной 3D модели / В.Л. Добросок, Л.Н. Абдурайимов, С.И. Чернышов // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. Технические науки. Симферополь: НИЦ КИПУ, 2010. Вып.24. - С.13-21.
266. Scheithauer G. Modeling of packing problems. Optimization / G. Scheithauer, J. Terno // 1993, 28.1. - pp. 63-84.
267. Hopper E. Application of genetic algorithms to packing problems—a review / E. Hopper, B. Turton // Soft Computing in Engineering Design and Manufacturing, 1998, - pp. 279-288.
268. Ortmann F.G. New and improved level heuristics for the rectangular strip packing and variable-sized bin packing problems / F.G. Ortmann, N. Ntene, V. Van, H. Jan // European Journal of Operational Research, 2010, 203.2: - pp. 306-315.
269. Zhang Z. Space defragmentation heuristic for 2D and 3D bin packing problems / Z. Zhang, S. Guo, W. Zhu, W.-C. Oon, A. Lim // Twenty-Second International Joint Conference on Artificial Intelligence. 2011. - pp. 699-704.

270. Bezdek K. Classical topics in discrete geometry / K. Bezdek. - New York, N.Y: Springer, 2010. doi: 10.1007/978-1-4419-0600-7.
271. Zhu W. Space defragmentation for packing problems / W. Zhu, et al. // European Journal of Operational Research, 2012, 222.3. - pp. 452-463.
272. Dykhoff H. A typology of cutting and packing problems / H. Dykhoff // European Journal of Operational research. 1990. Vol. 44. - P. 145-159.
273. Milenkovic V. J. Translational polygon containment and minimal enclosure using mathematical programming / V. J. Milenkovic, K. Daniels // ITOR special issue with papers from IFORS'96, 1996. – 30 p.
274. Leao A. A. Irregular packing problems: a review of mathematical models / A. A. Leao, F. M. Toledo, J. F. Oliveira, M. A. Caravilla, R. Alvarez-Valdés // Eur. J. Oper. Res. 282(3), 2020. - pp. 803–822. doi: 10.1016/j.ejor.2019.04.045
275. Araújo L. J. Analysis of irregular three-dimensional packing problems in additive manufacturing: a new taxonomy and dataset / L. J. Araújo, E. Özcan, J. A. Atkin, M. Baumers // Int. J. Prod. Res. 57(18), 2019. - pp. 5920–5934. doi: 10.1080/00207543.2018.1534016.
276. Стоян Ю.Г. Математические модели и оптимизационные методы геометрического проектирования / Ю. Г. Стоян, С. В. Яковлев. Киев: Наук. Думка. 1986. - 286 C.
277. Chekanin V. A. Improved data structure for the orthogonal packing problem / V. A. Chekanin, A. V. Chekanin // Advanced Materials Research. Trans Tech Publications Ltd, 2014. - pp. 3143-3146. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.390.591.
278. Coffman E. G. Approximation algorithms for bin packing: A survey / E. G. Coffman, M. R. Garey, D. S. Johnson. – Режим доступу: <http://www.math.nsc.ru/LBRT/k5/bp-chapter.pdf>. – Дата звернення: 22.03.2019.
279. Martello S. Knapsack problems / S. Martello, P. Toth. Chichester, UK: John Wiley and Sons, 1990. - P. 221.
280. Desale S. Heuristic and meta-heuristic algorithms and their relevance to

the real world: a survey / S. Desale, et al. // Int. J. Comput. Eng. Res. Trends, 2015, 351.5. - pp. 2349-7084.

281. Pandey P.M. Slicing procedures in layered manufacturing: a review / P. M. Pandey, N. V. Reddy, S. G. Dhande // Rapid Prototyping Journal, Vol. 9. Issue: 5. 2003. - pp. 274-288. doi: 10.1108/13552540310502185.

282. Абдурайимов Л.Н. Адаптивное разделение на слои исходной 3D модели изделия в технологиях быстрого прототипирования и изготовления / Л. Н. Абдурайимов // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. Технические науки. Симферополь: НИЦ КИПУ, 2009. Вып. 18. - С. 15-20.

283. Price M. J. C# 10 and .NET 6 – Modern Cross-Platform Development. Sixth Edition, 2021. - 792 p.

284. Szyperski C. Component software: beyond object-oriented programming / C. Szyperski, D. Gruntz, S. Murer // Pearson Education, 2002. - 571 с.

285. Wegner P. Concepts and paradigms of object-oriented programming. ACM Sigplan Ooops Messenger, 1990, 1.1: - pp. 7-87.

286. Добросок В. Л. Особенности описания 3D образов изделий STL-файлами / В. Л. Добросок, Л. Н. Абдурайимов, Я. Н. Гаращенко // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. пр. Харків: НТУ "ХПІ". 2006. Вип. 1(12). - С.159-164.

287. Добросок В.Л. Возможности современных CAD систем при переходе к триангулированным моделям. Високі технології в машинобудуванні / В. Л. Добросок, Я. Н. Гаращенко, С. И. Чернышов, Н. В. Зубкова // Харків: НТУ "ХПІ". 2010. Вип. 1(20). - С. 79-86.

288. Beyer W.H. (Ed.). CRC Standard Mathematical Tables, 28th ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 1987. - pp. 123-124.

289. Bourke P. Calculating the area and centroid of a polygon. 1997. – Режим доступу: <https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%91%D0%B0%D1%80%D0%BE%D1%87%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%BD%D0%BE%D0%BC&oldid=9000000>. - Дата звернення: 05.08.2019.

290. Hitan. Воксели (Voxel) [Електронний ресурс]. CodeNet.ru

(7.03.2009р). - Дата звернення: 24.07.2019.

291. Tedia S. Manufacturability analysis tool for additive manufacturing using voxel-based geometric modeling / S. Tedia, C. B. Williams // Solid Freeform Fabrication Symposium, An Additive Manufacturing Conference. 2016. - P. 3-22.

292. Ahn D. Fabrication direction optimization to minimize post-machining in layered manufacturing / Daekeon Ahn, Hochan Kim, Seokhee Le // International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 47, Issues 3–4, March 2007, - P. 593-606. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2006.05.004.

293. Bacchewar P. B. Statistical modelling and optimization of surface roughness in the selective laser sintering process / P. B. Bacchewar, S. K. Singhal, P. M. Pandey // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 221(1), 2007. - P. 35–52. doi: 10.1243/09544054jem670.

294. Thomas D. The development of design rules for selective laser melting. Thesis (PhD). - University of Wales, Cardiff, 2009. - 318 p. – Режим доступу: <http://hdl.handle.net/10369/913>. - Дата звернення: 18.01.2018.

295. Kranz J. Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4 / J. Kranz, D. Herzog, C. Emmelmann // Journal of Laser Applications, 27, 2015. - pp. 14001–14016. doi: 10.2351/1.4885235.

296. Seepersad C.C. A designer's guide for dimensioning and tolerancing SLS parts / C.C. Seepersad, T. Govett, K. Kim, M. Lundin, D. Pinero // Solid Freeform Fabrication Symposium. - Austin, TX, 2014. - pp. 921–931. – Режим доступу: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2012/2012-70-Seepersad.pdf>. - Дата звернення: 19.01.2018.

297. Wegner A. Design rules for laser sintering / A. Wegner, G. Witt // Journal of Plastics Technology, 8 (3), 2012. - pp. 252–277.

298. Psarra S. Describing shape and shape complexity using local properties / S. Psarra, T. Grajewski // Proceedings, 3rd International Space Syntax Symposium 2001. Atlanta, USA. 2001. pp. 28.1-28.16. – Режим доступу: <http://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1320681>. - Дата звернення: 20.01.2018.

299. Edgar G.A. Measure, topology, and fractal geometry. - New York: Springer, 2008. - 272 p. doi: 10.1007/978-0-387-74749-1.
300. Mandelbrot B. The fractal geometry of nature. - Macmillan, 1983. - 468 p.
301. Falconer K. Techniques in fractal geometry. - Chichester: Wiley, 1997. - 272 p.
302. Falconer K. Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications. - New York: Wiley, 2003. - 366 p.
303. Добросок В.Л. Использование цветовой визуализации топологических элементов моделей в учебном процессе / В.Л. Добросок, Я.Н. Гаращенко, А.В. Погарский // С. 96-104. В кн. Современные методы преподавания для студентов инженерных направлений: монография. под общ. ред. О.Н. Долининой. - Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2014. - 184 с.
304. Добросок В.Л. Совершенствование цветовой модели HSV для решения технологических задач / В. Л. Добросок, А. В. Погарский // Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського, Вип. 2 (85). - Кременчук: КрНУ, 2014. - С. 85-90.
305. Shwe P. Soe. Quantitative analysis on SLS part curling using EOS P700 machine / P. Soe. Shwe // Journal of Materials Processing Technology, 212 (2012), - pp. 2433– 2442. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.06.012.
306. Korte B. Bin-Packing. Combinatorial Optimization: Theory and Algorithms / B. Korte, J. Vygen // Algorithms and Combinatorics 21. Springer. 2006. - pp. 426–441. DOI: 10.1007/3-540-29297-7_18.
307. Berkey J.O. Two dimensional finite bin packing algorithms / J.O. Berkey, P.Y. Wong // Journal of Operational Research Society, 2, 1987. P. 423-429.
308. The bottom-left bin packing heuristic: An efficient implementation / B. Chazelle // IEEE Transactions on Computers, 32, 1983. - P. 697-707.
309. Колєчкіна Л. М. Властивості задач багатокритеріальної оптимізації на комбінаторних множинах та методи їх розв'язання / Л. М. Колєчкіна. Монографія – Полтава: РВВ ПУСКУ, 2008. - 162 с.

310. Nedelman J. Bayesian Data Analysis / A. Gelman, J.B. Carlin, H.S. Stern, D.B. Rubin. Chapman & Hall/CRC, Computational Statistics - Computation Stat. 20. 2004. - 657 p. doi: 10.1007/BF02741321.
311. Гаращенко Я.Н. Возможности визуального и статистического анализа для оценки применимости декомпозиции изделия при его послойном изготовлении / Я.Н. Гаращенко // Високі технології в машинобудуванні. - Харків, НТУ "ХПІ", Вип. 1 (28). 2018. - С. 44-53.
312. Гаращенко Я.Н. Оценка прогнозируемой эффективности декомпозиции изделия при его послойном изготовлении / Я.Н. Гаращенко // Резание и инструменты в технологических системах. - Харьков: НТУ «ХПИ», 2018. Вып. 89. - С. 18-32.
313. Гаращенко Я.М. Візуальна оцінка можливості раціональної орієнтації виробу при пошаровій побудові на установках адитивних технологій / Я.М. Гаращенко // Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки. - Житомир: ЖДТУ, Том 1, № 2(80), 2017. - С. 3-10. doi: 10.26642/tn-2017-2(80)-3-10.
314. Garashchenko Y. Evaluation of the forecasted efficiency of performance of rational orientation of the product in the workspace of additive installations / Y. Garashchenko, N. Zubkova // Cutting & Tools in Technological System, No. 94. 2021. - P. 142-150. doi: 10.20998/2078-7405.2021.94.16.
315. Garashchenko Y. Adaptive slicing in the additive manufacturing process using the statistical layered analysis / Y. Garashchenko, N. Zubkova // Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 2020. - P. 253-263. doi: 10.1007/978-3-030-50794-7_25.
316. Garashchenko Y. The Efficiency of Adaptive Slicing Group of Rationally Oriented Products for Layered Manufacturing / Y. Garashchenko, P. Dasic // Advanced Manufacturing Processes IV. InterPartner 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 2023. doi: 10.1007/978-3-031-16651-8_10.

ДОДАТОК.

ОСНОВНІ ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ В ОБЛАСТІ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Терміни та визначення в області адитивних технологій (адитивного виробництва) описано в міжнародному стандарті ISO/ASTM 52900:2017 “Additive manufacturing - General principles – Terminology” [1]. Основні терміни представлено в табл. 1-5.

Таблиця 1 – Основні терміни та визначення в області адитивних технологій

Термін (в стандарті ISO/ASTM 52900:2017)	Визначення
3D принтер (3D printer)	Установка (машина) для пошарової побудови виробів адитивними методами (3D друк).
Адитивні технології або адитивне виробництво (additive manufacturing)	Процес з'єднання матеріалу для виготовлення деталей з електронної геометричної моделі, який виконується, зазвичай шар за шаром, на відміну від виробництва, що виконується шляхом віднімання матеріалу (механічної обробки) і формотворчого виробництва.
Система адитивного виробництва (additive system, additive manufacturing system)	Обладнання адитивного виробництва, машина та допоміжне обладнання, що використовується для адитивного виробництва.
Адитивна установка (AM machine)	Частина системи адитивного виробництва, включаючи обладнання, програмне забезпечення для контролю машини, необхідні програмні засоби налаштування машини і периферійні допоміжні пристрої, необхідні для завершення циклу побудови деталей.
Багатокріковий (багатоетапний) процес (multi-step process)	Тип адитивного процесу виробництва, в якому деталі виготовляють за дві або більше операцій, де перша, як правило, забезпечує отримання основної геометричної форми, а наступні забезпечують основні необхідні властивості матеріалу (метал, кераміка, полімер або композит). Видалення підтримок та операція очищення можуть бути необхідними, але не розглядаються як окремий процес.
Однокріковий (одноетапний) процес (single-step process)	Тип адитивного процесу виробництва, в якому деталі виготовляють за одну операцію, де основна геометрична форма і властивості матеріалу досягаються одночасно.
Нанесення струменем сполучного матеріалу (binder jetting)	Процес адитивного виробництва, в якому рідкий сполучний матеріал вибірково наноситься на порошкові матеріали.

Таблиця 2 – Основні терміни та визначення за типами процесу в області адитивних технологій

Термін (в стандарті ISO/ASTM 52900:2017)	Визначення
Пряме підведення енергії і матеріалу (directed energy deposition)	Процес адитивного виробництва, в якому теплова енергія використовується для з'єдання матеріалів шляхом сплавлення в міру їх нанесення. Теплова енергія означає, що джерело енергії (наприклад, лазер, електронний промінь або плазма) використовується для повного або неповного розплавлення матеріалів, що наносяться.
Екструзія матеріалу (material extrusion)	Процес адитивного виробництва, в якому матеріал вибірково подається через сопло або жиклер.
Нанесення струменем матеріалу (material jetting)	Процес адитивного виробництва, в якому виготовлення об'єкта здійснюється нанесенням крапель будівельного матеріалу (які включають полімер і віск для фотозатвердіння).
Синтез на підкладці (powder bed fusion)	Процес адитивного виробництва, в якому поверхня попередньо нанесеного шару порошкового матеріалу вибірково повністю або частково розплавляється теплою енергією.
Листова ламінація (sheet lamination)	Процес адитивного виробництва, в якому виготовлення деталі здійснюється скріпленням листів матеріалу.
Фотополімеризація у ванні (vat photopolymerization)	Процес адитивного виробництва, в якому рідкий фотополімер у ванні вибірково твердіє (полімеризується) за допомогою світлового випромінювання.

Таблиця 3 – Основні терміни та визначення для технологій адитивного виробництва

Термін (в стандарті ISO/ASTM 52900:2017)	Визначення
1	2
3D друк (3D printing)	Одержання виробів шляхом нанесення матеріалу друкуючою головкою, соплом або іншою технологією друку. Термін часто використовується в нетехнічному контексті як синонім адитивного виробництва; до цього часу цей термін, зокрема, асоціювався з машинами, які мають низьку кінцеву ціну і/або загальну здатність.

Продовження табл. 3

1	2
Робоча камера (build chamber)	Замкнений об'єм всередині системи адитивного виробництва, в якому відбувається пошарова побудова деталей.
Цикл побудови (build cycle)	Одиничний цикл процесу, в якому один або більше компонентів виготовляються пошарово в робочій камері системи адитивного виробництва.
Діапазон координат побудови (build envelope)	Найбільші зовнішні розміри по X-, Y - і Z - осі в межах робочого простору побудови, в якому вироби можуть бути пошарово побудовані. Розміри робочого простору можуть бути більше діапазону координат побудови.
Робоча платформа установки (build platform)	База, що є поверхнею, з якої починається виготовлення деталей, і підтримкою під час всього процесу. У деяких системах вироби будуються прикріпленими до робочої платформи, або безпосередньо, або через структури підтримок. В інших системах прикріplення до робочої платформи не потрібне.
Робочий простір побудови (build space)	Місце, де можливе виготовлення деталі, як правило, розташовується в межах робочої камери або на робочій платформі.
Поверхня побудови (build surface)	Область, де відбувається нанесення матеріалу, як правило, розташовується на останньому шарі, який стає підставою для формування наступного шару. Для першого шару поверхнею побудови часто є робоча платформа. У разі процесу прямого підведення енергії і матеріалу, поверхнею побудови може бути існуюча деталь, на яку наноситься матеріал. Якщо напрямок нанесення матеріалу є змінною величиною, то поверхня побудови може визначатися по відношенню до поверхні конструкції.
Об'єм побудови (build volume)	Загальний використовуваний об'єм, доступний в установці для виготовлення деталей.
Зона подачі (feed region)	Ємність в установці, де зберігається сировина і з якої частина сировини доставляється на підкладку (шар порошку) протягом циклу побудови.
Шар (layer)	Нанесений (намазаний) матеріал для створення поверхні.
Система координат установки (machine coordinate system)	Тривимірна система координат визначається фіксованою точкою на робочій платформі з трьома головними осями, позначеними X, Y, Z, з напрямками обертання навколо кожної з цих осей, позначеними A, B, і C відповідно, де кути між X, Y і Z – декартові (або система може бути визначена виробником установки). Система координат установки зафікована по відношенню до установки, на відміну від координатних систем 3D-моделей виробів.

Продовження табл. 3

1	2
Виробнича партія (manufacturing lot)	Набір деталей (однієї серії), виготовлених з однієї сировини, системи адитивного виробництва і пост-обробки (при необхідності), виготовлено за єдиним технічним завданням. Система адитивного виробництва може включати в себе одну або кілька адитивних установок та/або установок пост-обробки.
Початок координат (origin)	Точка початку координат, в якій три основні осі в системі координат перетинаються. Нульова точка визначається виробником установки.
Нульова точка побудови (build origin)	Нульова точка, найбільш часто знаходитьться в центрі платформи пошарової побудови і визначає лицьову поверхню побудови, але може бути визначена налаштуваннями.
Нульове положення робочих органів установки (machine origin)	Початкове положення робочих органів установки.
Зона надлишків в синтезі на підкладці (overflow region)	Ємності, розташовані в установці, куди потрапляє і де зберігається надлишок порошку під час циклу побудови. Зона надлишків складається з однієї або кількох камер або систем рециркуляції порошку.
Положення деталі (part location)	Розміщення деталі в робочому просторі. Положення деталі, як правило, визначається координатами X , Y і Z положення його системи координат щодо нульової точки побудови.
Технологічні параметри (process parameters)	Набір робочих параметрів і системних налаштувань, що використовуються під час циклу пошарової побудови.
Серія деталей (production run)	Деталі, що вироблено в одному або послідовно в декількох циклах побудови з використанням однієї сировини і одинакових умов технологічного процесу.
Налаштування системи (system set-up)	Конфігурація адитивної системи.
Вісь X установки (x -axis)	Вісь в системі координат установки, яка проходить паралельно передній стороні установки і перпендикулярно до осі Y і Z . Позитивний напрямок осі X – напрямок зліва направо, якщо дивитися з боку передньої частини машини (від початку координат). Як правило, вісь X горизонтальна і паралельна одному з країв робочої платформи.

Продовження табл. 3

1	2
Вісь Y установки (y-axis)	<p>Вісь в системі координат установки, яка перпендикулярна осі Z і осі X. Позитивний напрямок осі Y визначається за правилом правої системи координат. Найчастіше, у разі позитивного напрямку осі Z вгору, позитивний напрямок по осі Y буде направлено від переднього до заднього боку установки. У разі позитивного напрямку осі Z вниз, позитивний напрямок по осі Y буде направлено від задньої частини установки до передньої. Як правило, вісь Y горизонтальна і паралельна з одним з країв платформи пошарової побудови.</p>
Вісь Z установки	<p>Вісь в системі координат установки, яка перпендикулярна осям X і Y.</p> <p>Позитивний напрямок осі Z визначається за правилом правої системи координат. Для процесів, що використовують пошарове нанесення матеріалу в одній площині, позитивний напрямок осі Z буде визначатися як нормаль до шарів.</p> <p>Для процесів, що використовують пошарове нанесення матеріалу в одній площині, позитивний напрямок осі Z це напрям від першого шару до наступних шарів.</p> <p>Коли нанесення матеріалу може виконуватися з різних напрямків (наприклад, як в процесі прямого підведення енергії і матеріалу), вісь Z може бути визначена щодо поверхні деталі.</p>

Таблиця 4 – Основні терміни та визначення щодо інформаційного забезпечення (обміну даних) адитивного виробництва

Термін (в стандарті ISO/ASTM 52900:2017)	Визначення	
	1	2
3D сканування (3D scanning)		Спосіб отримання форми та розмірів виробу в просторовому поданні шляхом запису X, Y, Z координат точок поверхні фізичного прототипу і перетворення набору точок в електронну геометричну 3D-модель за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення.
Формат файлів адитивного виробництва (Additive Manufacturing File Format, AMF)		Формат файлів для опису 3D-моделі та обміну даних, що включає в себе просторовий опис геометрії поверхні, з вбудованою підтримкою для кольору, матеріалів, координат вершин граней, груп елементів і метаданих. За аналогією з STL-форматом, геометрію поверхні представлено трикутними полігонами, але в даному випадку полігони можуть бути вигнутими.

Продовження табл. 4

1	2
Обмежуючий блок деталі (bounding box)	Ортогонально спрямований кубоїд з мінімальним периметром, який охоплює максимально віддалені точки поверхні 3D-моделі деталі.
Довільно орієнтований обмежувальний блок деталі (arbitrarily oriented bounding box)	Обмежувальний блок, який розраховується без будь-яких обмежень, що впливають на його орієнтацію.
Обмежувальний блок установки (machine bounding box)	Обмежувальний блок, в якому всі поверхні паралельні системі координат установки.
Грань (facet)	Трьох- або чотирьохсторонній полігон, що представляє собою елемент поліональної поверхневої 3D-моделі. Трикутні грані використовуються у AMF і STL файлах.
Геометричний центр, центроїд (geometric centre)	Локація у геометричному центрі обмежувального блоку деталі. Центр обмежувального блоку може знаходитись за межами деталі.
IGES (стандарт обміну графічною інформацією)	Нейтральний формат файлів, призначений для перенесення 2D і 3D даних між CAD-системами.
Початкова орієнтація побудови деталі (initial build orientation)	Орієнтація деталі, в якій вона була вперше поміщена в робочому просторі побудови.
PDES	Специфікація обміну інформацією або саме обмін інформацією щодо продукції з використанням STEP.
Орієнтація деталі	Обертання обмежуючого блоку навколо геометричного центру деталі відносно початкової орієнтації побудови.
STEP	Стандарт обміну даними 3D-моделі виробу.
STL	Формат даних 3D-моделі, що описує геометрію поверхні об'єкта системою трикутних полігонів.
Поверхнева модель (surface model)	Математичне представлення виробу у вигляді набору пласких і / або криволінійних поверхонь, яке може, але не обов'язково повинно являти собою замкнутий об'єм.

Таблиця 5 – Основні терміни та визначення за матеріалом, що використовується в адитивному виробництві

Термін (в стандарті ISO/ASTM 52900:2017)	Визначення	
	1	2
Затвердіння (curing)		Хімічний процес, результатом якого є матеріал з кінцевими властивостями або інший матеріал.

Продовження табл. 5

1	2
Сировина (feedstock)	Вихідні матеріали, що використовуються в процесі адитивного виробництва. Для процесів адитивного виробництва основними вихідними матеріалами, як правило, є рідини, порошки, суспензії, волокна, листи та ін.
Плавка (fusion)	Об'єднання двох і більше частинок матеріалу в одну частинку.
Лазерне спікання (laser sintering)	Процес синтезу на підкладці використовується для виробництва деталей з порошкових матеріалів з використанням одного або більше лазерів для вибіркового спікання або розплавлення частинок на поверхні в закритій камері, шар за шаром,. Більшість установок з лазерним спіканням частково або повністю розплавляють вихідні матеріали. Термін «спікання» є історичним і неправильним, на противагу традиційному спіканню металевих порошків за допомогою пресформ, температури і/або тиску.
Пост-процес (post-processing)	Один або більше етапів процесу, що відноситься до завершення циклу побудови адитивного виробництва, дозволяє досягти бажаних властивостей кінцевого продукту.
Партія порошку (powder batch)	Порошок, що використовується в якості сировини, який може бути використаним порошком, первинним порошком або їх сумішшю.
Підкладка (powder bed)	Область побудови в системі адитивного виробництва в якій сировина наноситься і вибірково сплавляється за допомогою теплової енергії або зв'язується за допомогою адгезії.
Порошкова композиція (powder blend)	Кількість порошку, отриманого шляхом ретельного перемішування порошків з однієї або кількох партій порошку, що мають одинаковий склад. Звичайним видом порошкової композиції є суміш первинного і використаного порошків. Особливі вимоги до порошкових композицій зазвичай визначаються їх застосуванням або домовленістю між постачальником і споживачем. У традиційній порошковій металургії існують відмінності між порошковою композицією і просто змішаними порошками. У разі порошкової композиції це суміш порошків з номінально ідентичним складом, а для змішаних порошків – суміш порошків з різним складом.

Продовження табл. 5

Партія порошку (powder lot)	Кількість порошку, виробленого при контрольованих вимогах, за один цикл порошкового виробництва.
Використаний порошок (used powder)	Порошок, який був використаний в якості сировини для установки як мінімум в одному циклі побудови.
Первинний порошок (virgin powder)	Невикористаний порошок з однієї партії порошку.

Наукове видання

ГАРАЩЕНКО Ярослав Миколайович

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГЧНОЇ ПІДГОТОВКИ АДИТИВНОГО
ВИРОБНИЦТВА СКЛАДНИХ ВИРОБІВ

Монографія

Роботу до видання рекомендував Олександр ШЕЛКОВИЙ

В авторській редакції

План 2023 р., поз. 11

Підп. до друку 04.04.2023 р. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 17,8.

Видавничий центр НТУ «ХПІ», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002
Свідоцтво про державну реєстрацію № 5478 від 21.08.2017 р.

Електронна версія