

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**АБДУРАЙІМОВ ЛЕНМАР НАРИМАНОВИЧ**

УДК 621.7

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
ПОШАРОВОГО ВИРОЩУВАННЯ ВИРОБІВ ШЛЯХОМ  
МОРФОЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ ЇХ 3D ОБРАЗУ**

Спеціальність 05.02.08 – технологія машинобудування

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі інтегрованих технологій машинобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

**Науковий керівник** доктор технічних наук, професор  
**Доброскок Володимир Ленінмирович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут», м. Харків,  
професор кафедри інтегрованих технологій  
машинобудування

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Внуков Юрій Миколайович**,  
Запорізький національний технічний університет,  
м. Запоріжжя,  
проректор з наукової роботи, завідувач кафедри  
технологій машинобудування

доктор технічних наук, професор  
**Пасічник Віталій Анатолійович**,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут», м. Київ,  
завідувач кафедри інтегрованих технологій  
машинобудування

Захист відбудеться «11» квітня 2013 р. о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.12 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий «07» березня 2013 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Пермяков О.А.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сучасне машинобудування характеризується сукупністю високих вимог насамперед до технічного рівня та якості продукції, гнучкості та ресурсозбереження виробництва. Тому саме інтегровані генеративні технології пошарового вирошування (Rapid Prototyping) на базі комп'ютерної 3D моделі без застосування технологічного оснащення та інструменту набувають потужного розвитку в технічно розвинутих країнах. Основним чинником цього є суттєве (30÷70%) скорочення часу повного циклу виробництва, і залежно від ступеня складності виробу скорочення часу може сягати навіть десятків разів.

Висока вартість технології Rapid Prototyping змушує основну масу машинобудівників у розвинутих країнах замість власного виробництва прототипів користуватись послугами спеціалізованих центрів. Таким чином, питома (відносно інших ланок машинобудівного виробництва) вартість Rapid технології залишається важливим, але не критичним чинником, що стимулював би пошук наукових підходів і рішень.

В Україні і на пострадянському просторі ця технологія ще не набула значного поширення, а питома вартість технології Rapid Prototyping незрівнянно вища. Оскільки науково обґрунтована методологія вибору стратегії матеріалізації виробів перебуває тільки на початку свого створення, то при виборі методу наукового пошуку перевага на боці найбільш комплексного. Одним з таких методів є морфологічний аналіз. Для предметної галузі машинобудування морфологічний аналіз визначається як структурно-кількісний аналіз твердотільного виробу, представленого у вигляді системи елементарних поверхневих об'єктів, що обмежують простір тіла.

Тому підвищення ефективності використання інтегрованих генеративних технологій пошарового вирошування виробів на базі морфологічного аналізу їхнього 3D образу, тобто ще на етапі підготовки до матеріалізації за технологією Rapid Prototyping, являє собою актуальне наукове і практичне завдання, вирішення якого і визначило напрямки досліджень дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Виконання дисертаційної роботи пов'язане з науковою тематикою кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка НТУ «ХП» у рамках держбюджетної науково-дослідної роботи МОНмолодьспорту України «Розробка теоретичних основ морфологічного аналізу 3D образу складних виробів при підготовці до матеріалізації інтегрованими ресурсозберігаючими технологіями» (ДР № 0110U001238), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дослідження є підвищення ефективності інтегрованих генеративних технологій пошарового вирошування виробів шляхом морфологічного аналізу їхніх електронних 3D моделей на етапі, що передуює матеріалізації.

Для досягнення зазначеної мети поставлено такі задачі:

1. Провести аналіз сучасного стану інтегрованих генеративних технологій та шляхів підвищення їх ефективності на базі дослідження електронних 3D образів промислових виробів.
2. Розробити основні підходи до морфологічного аналізу триангуляційних

3D моделей складних виробів з використанням системи комплексних критеріїв.

3. Розробити методологію оцінки складності поверхонь промислових виробів на основі триангуляційних 3D моделей для використання при технологічній підготовці виробництва на етапі, що передуює матеріалізації.

4. Розробити програмне забезпечення морфологічного аналізу 3D образів виробів і практичні рекомендації щодо його використання в якості системи технологічної підготовки виробництва у частині визначення раціональної орієнтації виробів у просторі, оптимального розміщення на робочій платформі установки пошарового вирощування для скорочення часових і трудових витрат на виготовлення.

5. Виконати практичну реалізацію запропонованих підходів, що забезпечать підвищення ефективності використання інтегрованих генеративних технологій шляхом морфологічного аналізу 3D образів машинобудівних виробів.

*Об'єкт дослідження* – інтегровані генеративні технології пошарового вирощування виробів.

*Предмет дослідження* – підвищення ефективності інтегрованих генеративних технологій пошарового вирощування виробів на базі морфологічного аналізу їхніх електронних триангуляційних моделей.

**Методи дослідження.** При виконанні дисертаційної роботи використовувалися наукові положення технології машинобудування, формоутворення поверхонь, лазерної обробки, геометричного моделювання та комп'ютерної математики. Методологія досліджень базується на використанні електронного твердотільного образу виробу у вигляді триангуляційного подання, що створюється в сучасних системах 3D CAD моделювання. Коректність твердотільних моделей визначали за даними топологічного і морфометричного аналізів. Оцінка ступеня складності промислових виробів провадилася методом застосування класичної та дискретної диференціальної геометрії. Прогнозування технологічного часу формоутворення виробів інтегрованими генеративними технологіями проводилося з використанням методів теорій імовірності і прикладної статистики. Результати, висновки та рекомендації підтверджено модельними комп'ютерними і натурними експериментами за алгоритмами і методиками, розробленими і реалізованими здобувачем. Експериментальні дослідження проводилися з використанням системи лазерної стереолітографії SLA-5000 та системи вибіркового лазерного спікання на базі установки Vanguard Si2 SLS у навчально-науково-виробничому об'єднанні «Високі технології в машинобудуванні» при НТУ «ХП».

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Вперше висунуто доказову гіпотезу про необхідність морфологічного аналізу 3D образу виробів для забезпечення прийняття науково обґрунтованих рішень на етапі, що передуює матеріалізації.

2. Вперше запропоновано і реалізовано підхід до оцінки ступеня складності промислових виробів, заснований на аналізі кривини їхніх формоутворюючих поверхонь. В якості комплексного показника оцінки ступеня складності запропоновано використовувати добуток інформаційних ентропій гаусової та середньої кривини поверхонь.

3. Вперше виявлено взаємозв'язок статистичних характеристик триангуляційної 3D моделі виробу з її топологічними властивостями і рівнем ефективності матеріалізації.

4. Запропоновано і обгрунтовано ефективність заміни ймовірнісних експертних оцінок геометричних характеристик виробу (нечітких величин) на модельні статистичні, які одержуються в системі морфологічного аналізу. Це підвищує точність прогнозування технологічного часу виготовлення виробів інтегрованими генеративними технологіями пошарового вирощування.

5. Розроблено і реалізовано модель технологічної оптимізації просторової орієнтації, розміщення й матеріалізації виробів інтегрованими генеративними технологіями.

**Практичне значення одержаних результатів** для машинобудівної галузі полягає у розробленні програмного забезпечення «Система морфологічного аналізу 3D образів виробів на основі STL-файлів», що забезпечує прийняття науково обгрунтованих рішень щодо раціональної просторової орієнтації, вибору змінних товщин матеріалізованих шарів, оптимального розміщення виробів на робочій платформі установки пошарового вирощування на етапі, що передує матеріалізації, для скорочення часових і трудових витрат. Вдосконалено методику прогнозування технологічного часу формоутворення виробів інтегрованими генеративними технологіями на основі фактичних розрахункових характеристик триангуляційній 3D моделі для отримання більш достовірних результатів. Розроблено методику верифікації твердотільних моделей, засновану на топологічному та морфометричному аналізі триангуляційних 3D моделей промислових виробів.

Розроблене програмне забезпечення і практичні результати дисертаційної роботи впроваджено на ПрАТ «Верифікаційні моделі» (м. Харків) для забезпечення підтримки прийняття технологічних рішень на етапі, що передує матеріалізації. Це дозволяє знизити часові і трудові витрати при пошаровому виготовленні. Очікуваний річний економічний ефект від впровадження результатів роботи складає 35 тис. грн.

Результати досліджень використовуються у навчальному процесі кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка НТУ «ХПІ» при підготовці фахівців зі спеціальності 8.05050201 «Технологія машинобудування»; кафедри металорізального обладнання і транспортних систем Української інженерно-педагогічної академії (м. Харків) – при підготовці фахівців з навчальної спеціальності 8.0101041 «Професійне навчання. Машинобудування»; кафедри технології машинобудування РВНЗ «Кримський інженерно-педагогічний університет» (м. Сімферополь) – при підготовці бакалаврів з навчальної спеціальності 6.010104 «Професійна освіта» профілю підготовки «Машинобудування».

**Особистий внесок здобувача.** Теоретичні та модельні дослідження, розроблення алгоритмів, методик, програмного продукту і результатів, які виносяться на захист дисертаційної роботи, отримано здобувачем особисто. Постановка завдань досліджень, аналіз і обговорення отриманих результатів виконувались здобувачем спільно з науковим керівником. Проведення

виробничих випробувань і впровадження результатів роботи виконано спільно зі співробітниками навчально-науково-виробничого об'єднання «Високі технології в машинобудуванні» при НТУ «ХПІ» (м. Харків). Роботи по підготовці деяких статей і деклараційних патентів України виконано за участю співавторів. У роботі наведено посилання на авторів і відповідні джерела при використанні відомих даних.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові положення і результати роботи доповідалися на: XIV-XX Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2006-2012); XV, XVII, XVIII і XX Міжнародних науково-практичних семінарах «Високі технології в машинобудуванні» (Харків – Алушта, 2006, 2008, 2009, 2012); Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні напрямки і перспективи розвитку технологій обробки і устаткування в машинобудуванні «Механообробка. Севастополь-2012» (Севастополь, 2012); IX і XII Всеукраїнських молодіжних науково-технічних конференціях «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво» (Запоріжжя, 2009; Київ, 2012); 13th International Conference on Tools “ICT-2012” (Мішкольц, Угорщина, 2012); наукових семінарах кафедри «Інтегровані технології машинобудування» ім. М.Ф. Семка Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (2006-2012). Дисертаційна робота доповідалася у повному обсязі на Міжнародному науково-практичному семінарі «Високі технології в машинобудуванні» (Харків – Алушта, 2012) і XII Всеукраїнській молодіжній науково-технічній конференції «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво» (Київ, 2012).

**Публікації.** Основний зміст дисертації відображено у 18 наукових публікаціях, з них: 9 статей у фахових виданнях України, 2 деклараційні патенти України, 6 у матеріалах конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і трьох додатків. Повний обсяг дисертації складає 264 сторінки, з них 6 рисунків за текстом, 66 рисунків на 47 окремих сторінках, 12 таблиць на 12 окремих сторінках, список використаних джерел зі 130 найменувань на 14 сторінках, 3 додатки на 39 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність досліджень, сформульовано їх мету і завдання, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичну значущість роботи.

**Перший розділ** присвячено аналізу сучасного стану і тенденцій розвитку інтегрованих генеративних технологій пошарового вирощування виробів в умовах високовиробничого процесу. Аналіз виробничого циклу створення нового виробу свідчить про необхідність використання прототипу. На проектування й виготовлення прототипів витрачається в середньому до 25% загального часу; до 60% прототипів потребують тривалого часу виготовлення. Таким чином, система підготовки виробництва моделювання і створення прототипів потребує значної

частки витрат ресурсів і часу.

Аналіз інформаційних джерел з досліджуваної проблеми показав, що в існуючих працях відсутні науково обґрунтована методологія вибору стратегії матеріалізації виробів на базі аналізу їх електронного 3D образу і можливість прийняття раціональних технологічних рішень на етапі, який передує матеріалізації.

На підставі аналізу стану вирішення завдання підвищення ефективності інтегрованих генеративних технологій шляхом морфологічного аналізу 3D образів виробів на етапі, який передує матеріалізації, сформульовано можливості його вирішення.

**Другий розділ** присвячено методикам, які було розроблено і використано в експериментальних і модельних дослідженнях інтегрованих генеративних технологій пошарового вирощування виробів.

Методологія досліджень заснована на використанні триангуляційної моделі твердотілого виробу. Необхідною умовою для використання процесів прискореного виготовлення генеративними способами пошарового вирощування виробів є наявність коректних триангуляційних 3D моделей. Вони отримуються на базі твердотілого або поверхневого опису виробів. Одержання моделей здійснювалося з використанням сучасних систем тривимірного моделювання, а перевірка на їхню коректність застосуванням готового та розробленого спеціального програмного забезпечення.

Для проведення морфологічного аналізу триангуляційних 3D моделей розроблено оригінальне програмне забезпечення, яке дозволило досліджувати топологічні, морфометричні та статистичні характеристики, а також властивості виробів на етапі, який передує матеріалізації.

Верифікація твердотілих моделей здійснювалася на основі розроблених методик, заснованих на топологічному та морфометричному аналізі триангуляційних 3D моделей промислових виробів. Важливість етапів візуального контролю, оптимізації конструкції моделі та покрокової її верифікації протягом усього процесу матеріалізації, полягає в запобіганні можливої появи різного роду помилок як на стадії проектування 3D CAD-моделі, так і безпосередньо в процесі її пошарового вирощування.

Розроблені оригінальні методики представлені наступними групами: визначення поверхневих дефектів і правильності триангуляційних 3D моделей; перевірка наявності вироджених граней і узгодженості напрямку векторів нормалей трикутників; аналіз суміжності граней та ін.

Розроблено також методику розділення триангуляційної 3D моделі на шари побудови. Процес розділення моделі на шари побудови складався з декількох етапів. На першому етапі визначаються координати вершин двовимірного перерізу (контуру), що утворюється шляхом перетину січної площини з триангуляційної 3D моделлю. На другому етапі визначається належність знайденого контуру до групи внутрішніх або зовнішніх.

Оцінка ступеня складності промислових виробів провадилася методом застосування класичної та дискретної диференціальної геометрії. Прогнозування технологічного часу формоутворення виробів виконувалося з використанням

розробленого програмного забезпечення та системи статистичного моделювання робочих процесів інтегрованих генеративних технологій. Експериментальні дослідження проводилися з використанням сучасних систем лазерної стереолітографії SLA-5000 та вибіркового лазерного спікання на базі установки Vanguard Si2 SLS (рис. 1) у навчально-науково-виробничому об'єднанні «Високі технології в машинобудуванні» при НТУ «ХПІ», створеному вперше в Україні у 2003 році.

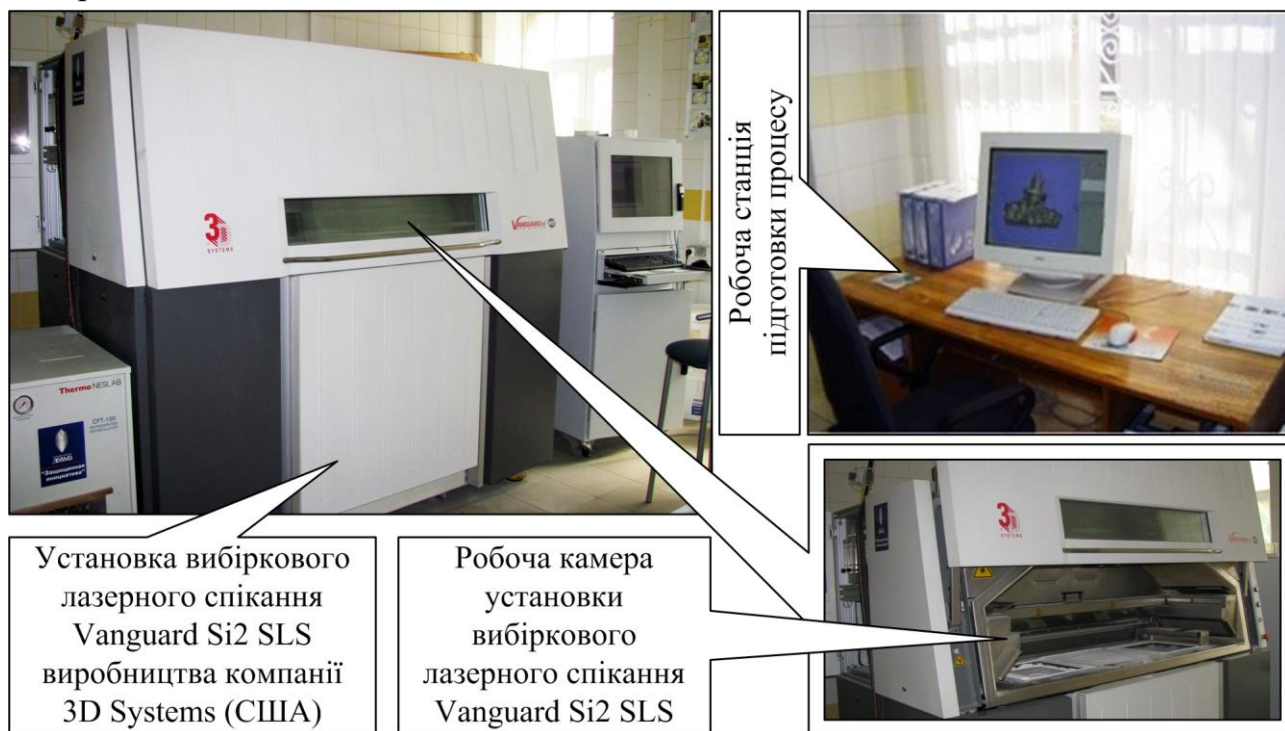


Рис. 1. Система вибіркового лазерного спікання на базі установки Vanguard Si2 SLS

**Третій розділ** присвячено розробленню оригінальної комп'ютерної системи для проведення морфологічного аналізу 3D образів виробів. Основне призначення системи – проведення топологічного і морфометричного аналізів з отриманням технологічних рекомендацій щодо раціонального виконання матеріалізації виробів. Така необхідність у розробці комп'ютерної системи виникла внаслідок того, що використовувані триангуляційні 3D моделі промислових виробів складаються з великої кількості топологічних елементів (зазвичай сотні тисяч трикутників) зі специфічними взаємними зв'язками.

Проведено аналіз особливостей STL-формату опису триангуляційних моделей промислових виробів із вивченням характеристик двох різних типів файлів: текстового (ASCII) і двійкового (Binary). Виявлено переваги та недоліки двох типів файлів. Аналіз дозволив розробити спеціальну структуру даних (DBF образ), яка використовується при проведенні досліджень. Вихідні STL-файли перетворюються на DBF образи із заданою точністю округлення координат вершин трикутників та направляючих косинусів векторів нормалей. Створені DBF образи являють собою базові таблиці триангуляційних даних.

Бази даних системи морфологічного аналізу триангуляційних моделей розділено на дві групи: системні або загального користування (використовуються при роботі системи) і що створюються для кожної 3D моделі.

При проведенні досліджень запропоновано та обґрунтовано необхідність



створення розширеного DBF образу для подальшого топологічного аналізу. Така необхідність виникає при аналізі електронних моделей на коректність, цілісність та замкненість. Для основних топологічних об'єктів 3D моделі використовувалась спеціальна структура даних (рис. 2), яка дозволило зберігати інформацію про взаємну зв'язність об'єктів. Розширений DBF образ триангуляційної моделі виробу являє собою групу з трьох таблиць. В кожній записи такої таблиці міститься інформація про суміжні та інцидентні з нею елементи.

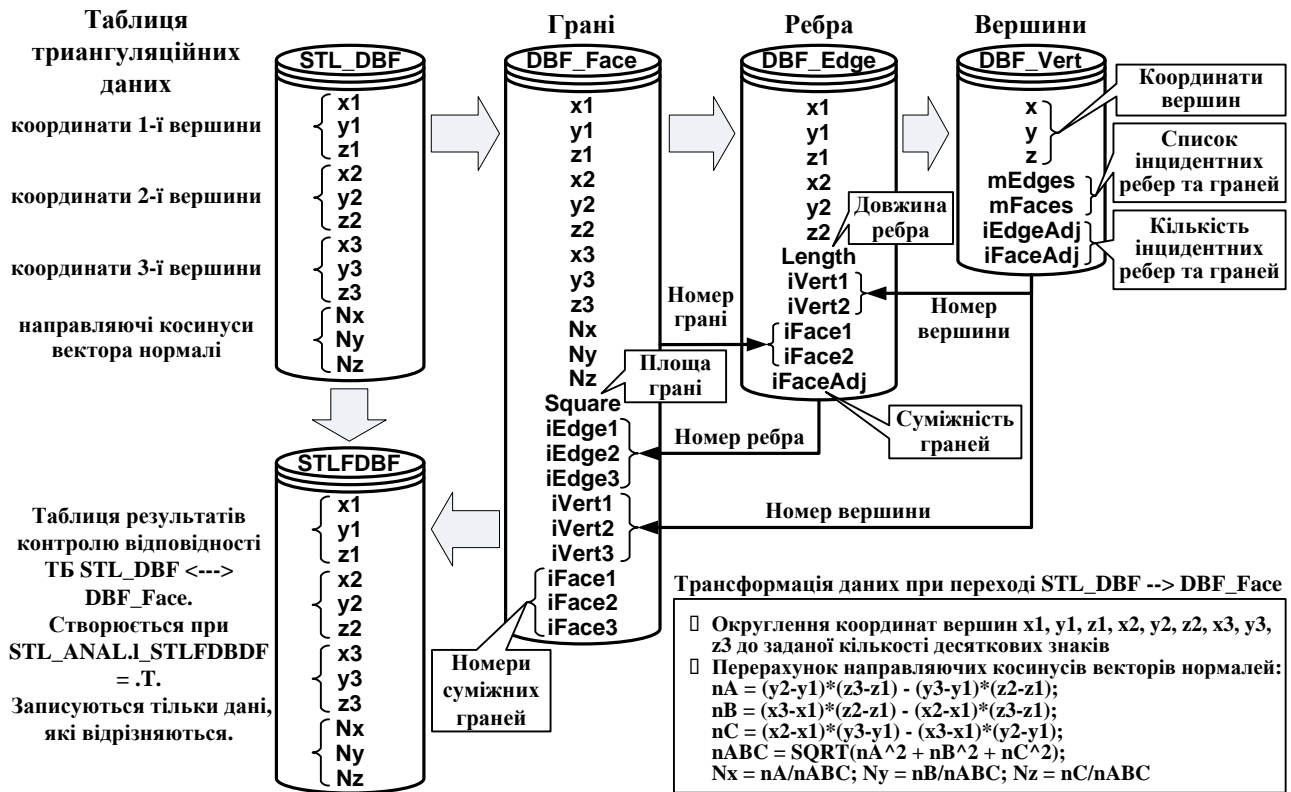


Рис. 2. Структура даних при топологічному аналізі триангуляційних 3D моделей виробів

В рамках морфологічного аналізу триангуляційних 3D моделей виробів реалізована візуалізація результатів. Достатньо опрацьована методологія візуалізації даних необхідна як на етапі розроблення системи морфологічного аналізу 3D образів виробів, так і під час її використання. Прийняти об'єктивні рішення при аналізі результатів досліджень важко, а часом і просто неможливо без наочної візуалізації даних і результатів. Тому розроблено окремі підсистеми, які забезпечують візуалізацію 3D моделей виробів та їхніх перерізів. Ця оригінальна підсистема для візуалізації двовимірних перерізів моделі виконує кольорове фарбування окремих об'єктів. Візуалізація триангуляційних 3D моделей виробів здійснювалось як за допомогою спеціально розробленої комп'ютерної системи, так і зовнішніх безкоштовних програмних продуктів.

Методологія інтегрованих генеративних технологій суттєво відрізняється від традиційних. Ефективність процесу матеріалізації виробів на установках пошарового вирощування можна суттєво підвищити, виготовляючи декілька виробів одночасно з максимальним завантаженням площі робочої платформи. Тому для автоматизованого розміщення виробів на робочій платформі установки пошарового вирощування розроблена спеціальна комп'ютерна програмна підсистема. В основу покладено генетичний алгоритм. Це забезпечило

знаходження оптимальних рішень за досить короткий час для різних груп триангуляційних моделей промислових виробів.

На основі підсистеми розділення триангуляційної 3D моделі виробу на шари отримані геометричні характеристики окремих перерізів. Одержувані дані використовуються при прогнозуванні технологічного часу формоутворення виробів. Для цього реалізований спеціальний програмний модуль передачі даних у систему статистичного моделювання робочих процесів інтегрованих генеративних технологій, розробленої на кафедрі інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка НТУ «ХП». Передача даних здійснюється шляхом послідовного експорту та імпорту спеціальних баз даних досліджуваних ознак. Результати статистичного аналізу геометричних характеристик перерізів на прикладі корпусу експериментального виробу представлено на рис. 3. Наведено гістограми щільності ймовірності та функцій розподілу коефіцієнтів  $K_S$  (коефіцієнт заповнення робочої області установки пошарового вирощування виробів) та  $K_Y$  (коефіцієнт розміру перерізу по осі  $OY$ ).

Корпус експериментального виробу  
136.834×89×133.406 (X×Y×Z), мм

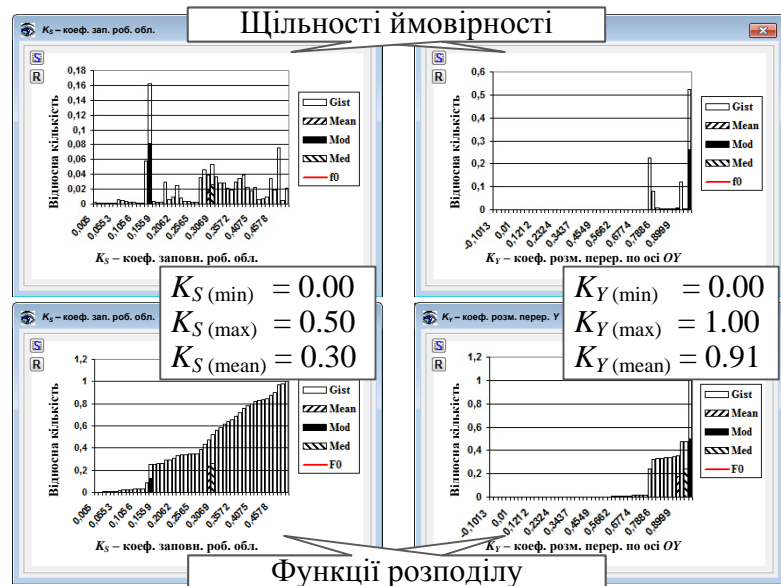
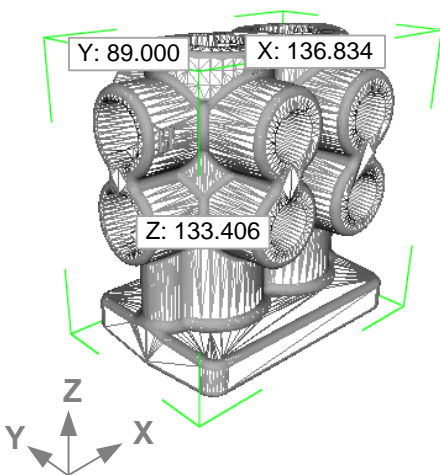


Рис. 3. Приклад статистичного аналізу геометричних характеристик перерізів триангуляційної 3D моделі корпусу експериментального виробу

**Четвертий розділ** присвячено розробці основних положень морфологічного аналізу електронних 3D образів виробів. Розроблено систему узагальнених нормалізованих критеріїв якості триангуляційних 3D моделей промислових виробів, створених в CAD-системах для подальшої матеріалізації інтегрованими генеративними технологіями (Rapid Prototyping). Нормалізація критеріїв забезпечується шляхом введення в розрахункові залежності нормалізуючих коефіцієнтів для приведення інтервалів можливих значень до єдиного діапазону  $(0, 1]$ . Використання якісних моделей виробів є досить важливим завданням. Це мінімізує кількість різного роду помилок при побудові виробів на установках пошарового вирощування.

Представлено інтегральні характеристики триангуляційних 3D моделей промислових виробів, які використовуються при вирішенні завдань морфологічного аналізу на етапі підготовки до матеріалізації виробів інтегрованими генеративними технологіями.

Велика кількість елементів триангуляційної моделі (зазвичай сотні тисяч трикутників) зі специфічними взаємними зв'язками потребує використання топологічної верифікації. Це забезпечує оцінку топологічних властивостей твердотільного виробу. В рамках топологічного аналізу визначається ейлерова характеристика  $\chi$ , яка виражає топологічні властивості поверхні триангуляційної 3D моделі виробу

$$\chi = N_{Face} - N_{Edge} + N_{Vert}, \quad (1)$$

де  $N_{Face}$ ,  $N_{Edge}$  та  $N_{Vert}$  – відповідно кількість граней, ребер і вершин, а співвідношення (1) називається формулою Ейлера.

У топології родом замкнутої та зв'язної поверхні називається число, яке дорівнює кількості наскрізних отворів у тілі. Для замкнутих полігональних поверхонь значення роду поверхні  $g$  лежать в інтервалі  $[0, N]$ , де  $N$  – множина всіх натуральних чисел.

Рід  $g$  поверхні триангуляційної моделі визначається на підставі ейлерової характеристики  $\chi$

$$g = \frac{2s - (N_{Face} - N_{Edge} + N_{Vert})}{2} = s - \frac{\chi}{2}, \quad (2)$$

де  $s$  – загальна кількість оболонок моделі.

На підставі залежності (2) робиться висновок про замкнутість триангуляційної моделі. Ейлерова характеристика  $\chi$  поверхні повинна бути цілим числом  $\chi \leq 2$  та кратним двом. Інакше рід поверхні буде дрібним, тобто модель буде незамкнутою.

Для проведення топологічного аналізу в роботі розроблено диференційні та інтегральні характеристики, які виконують верифікацію твердотільних моделей.

Упродовж всього циклу підготовки виробництва виникає необхідність розроблення кількісного показника, що дозволяє оцінити складність та трудомісткість виготовлення промислового виробу.

Для оцінки ступеня складності промислового виробу використовувалася інформація про кривину поверхонь. Якщо триангуляційні моделі виробів являють собою систему взаємопов'язаних між собою плоских поверхневих трикутників, то гаусова (повна)  $K_k$  та середня  $H_k$  кривини поверхні в вершині  $V_k$  моделі визначалися на базі таких співвідношень:

$$K_k = \frac{2\pi - \sum_{i=1}^{N_k} \varphi_i}{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^{N_k} S_i}, \quad H_k = \frac{\frac{1}{4} \sum_{j=1}^{N_k} E_j \beta_j}{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^{N_k} S_i}, \quad (3)$$

де  $N_k$  – кількість трикутників із загальною вершиною  $V_k$ ;  $S_i$  – площа  $i$ -го трикутника  $F_i$ , сторони якого є інцидентними вершині  $V_k$ ;  $\varphi_i$  – внутрішній кут трикутника  $F_i$  при вершині  $V_k$ ;  $E_j$  – довжина загального ребра двох суміжних трикутників, інцидентних вершині  $V_k$ ;  $\beta_j$  – двогранний кут при ребрі  $E_j$  (кут між векторами нормалей суміжних по ребру  $E_j$  трикутників  $F_{i-1}$  та  $F_i$ ).

У процесі аналізу результатів моделювання виникла робоча гіпотеза щодо необхідності розробки узагальненого критерія оцінки складності на базі інформаційної ентропії значень кривин. В якості такого кількісного показника для оцінки складності поверхонь промислових виробів запропанована і

використована інформаційна ентропія гаусової і середньої кривин поверхонь. Інформаційна ентропія  $I(x)$  досліджуваної ознаки  $x$  визначається як

$$I(x) = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m [p_i \ln(p_i), \text{ якщо } p_i > 0; \text{ інакше } 0], \quad (4)$$

де  $p_i$  – відносна частота досліджуваної ознаки  $x$ ,  $\sum_{i=1}^m p_i = 1$ ;  $m$  – кількість однакових інтервалів розбивки.

Аналіз результатів розрахунків на базі тестових моделей показав, що слід використовувати більш представницькі показники складності – комплексні з діапазоном можливих значень  $[0, 1]$ . В якості таких комплексних показників розглядалися напівсума інформаційних ентропій  $I(K)$ ,  $I(H)$  та їхній добуток:  $I_1 = (I(K) + I(H))/2$ ;  $I_2 = I(K) \cdot I(H)$ .

Використання комплексного показника  $I_2$  дозволяє домогтися кращих результатів порівняно до  $I_1$ . Тому в якості показника складності доцільно використовувати  $I_2$ , що визначається як добуток інформаційних ентропій гаусової та середньої кривин поверхні (рис. 4, 5).

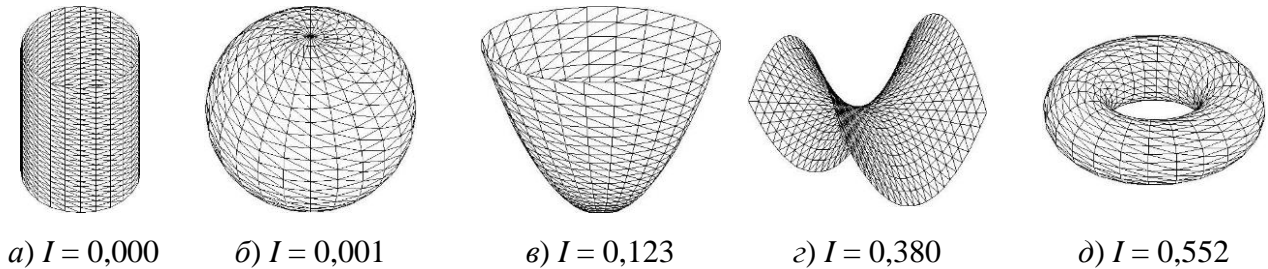


Рис. 4. Основні аналітичні поверхні розташовані в порядку збільшення величини складності, яка визначається на базі інформаційної ентропії  $I$ : а – циліндрична; б – сферична; в – еліптичний параболоїд; з – гіперболічний параболоїд; д – тор

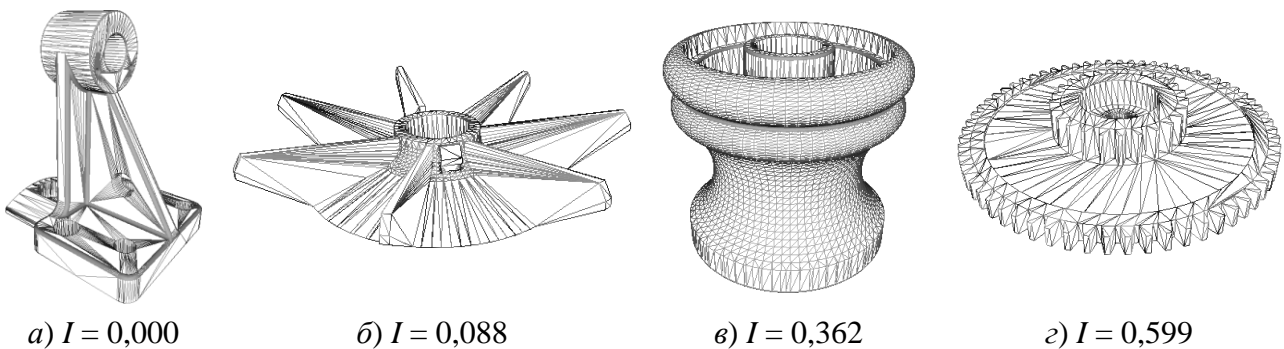


Рис. 5. Тестові триангуляційні 3D моделі виробів розташовані в порядку збільшення величини складності, яка визначається на базі інформаційної ентропії  $I$ : а – кронштейн; б – гвинт; в – корпус з'єднувального пристрою; з – блок зубчатих коліс

**У п'ятому розділі** представлено практичні результати реалізації та приклади використання розробленої системи морфологічного аналізу триангуляційних моделей промислових виробів, що забезпечують підвищення ефективності інтегрованих генеративних технологій за рахунок регулювання точності формоутворення виробів та скорочення часу їх виготовлення.

Вибір раціональної орієнтації виробу в просторі здійснюється шляхом використання в якості критерію оптимальності показника, в ролі якого виступає

відносна сума площ трикутників триангуляційної моделі, вектори нормалей яких утворюють з напрямком вектора побудови кути  $\pi/2$  або  $\pi$ . Обрана раціональна орієнтація згідно з цим критерієм забезпечує підвищення якості виготовлених виробів за рахунок зменшення похибки формоутворення, відповідно до чого цільову функцію оптимізаційної моделі раціональної орієнтації виробу на платформі установки представлено так

$$F = \max \left( \sum_{i=1}^{N_{Face}} S_i / S \right), \quad (5)$$

де  $N_{Face}$  та  $S$  – відповідно загальна кількість трикутників та площа повної поверхні триангуляційної моделі;  $S_i$  – площа  $i$ -го трикутника, вектор нормалі якого утворює з вектором побудови виробу кут  $\pi \pm \Delta\varphi$  ( $\Delta\varphi$  – точність округлення кутів повороту виробу щодо осей координат).

На таке технічне рішення за результатами досліджень отримано деклараційний патент України на корисну модель: пат. 54398 U від 10.11.2010.

Приклад вибору раціональної орієнтації виробу представлено на рис. 6. В

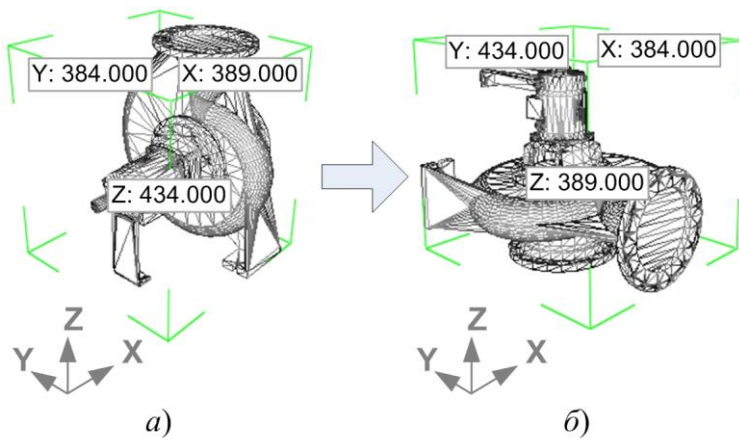


Рис. 6. Приклад раціональної орієнтації насоса з виступаючим корпусом підшипника в просторі при пошаровій матеріалізації за критерієм максимізації якості формоутворення:  
а – вихідна орієнтація; б – результуюча орієнтація

результаті раціональні кути послідовних поворотів насоса навколо координатних осей  $OZ$ ,  $OX$  будуть такими:  $\varphi(OZ) = -\pi/2$ ,  $\varphi(OX) = -3\pi/2$ .

Аналіз ступеня впливу технологічних параметрів на час виготовлення виробу в існуючих роботах показав, що найбільш значущими з них є: вихідна висота виробу, площа робочої області, яку займає деталь, і товщина шару. Тому в якості одного зі способів зменшення технологічного часу формоутворення необхідно одночасно

виготовляти декілька виробів з оптимальним (найбільш щільним) розміщенням на робочій платформі для зменшення площі займаної робочої області.

Розміщення виробів на робочій платформі вирішувалась для двомірного упакування. Автоматичне оптимальне розміщення триангуляційних моделей виробів на робочій платформі установки пошарового вирощування здійснювалось на базі застосування розробленої підсистеми морфологічного аналізу з використанням генетичного алгоритму.

Дослідження показали, що для підвищення продуктивності процесу формоутворення доцільно змінювати величину кроку побудови на кожному етапі так, щоб похибка формоутворення не перевищувала наперед заданої допустимої величини. Використання змінного кроку побудови є резервом підвищення продуктивності процесу матеріалізації (можна зменшити технологічний час і підвищити точність формоутворення складних виробів). Виявлено, що величину

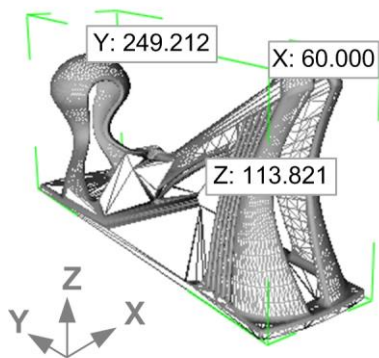
кроку побудови виробів для окремого шару треба визначати на базі такого співвідношення

$$h_i = \frac{\Delta}{\cos \varphi_{i(\min)}}, \quad (6)$$

де  $h_i$  – величина кроку побудови для  $i$ -го нарощуваного шару;  $\Delta$  – допустима похибка формоутворення виробу;  $\varphi_{i(\min)}$  – мінімальне значення з усіх розрахованих величин кутів між векторами нормалей площин трикутників триангуляційної 3D моделі, що належать  $i$ -му шару виробу, і вектором побудови виробу.

На таке технічне рішення за результатами досліджень отримано деклараційний патент України на корисну модель: пат. 46418 U від 25.12.2009.

Приклад вибору змінних товщин шарів побудови представлено на рис. 7.



- постійний крок побудови  
 $h = 0,025$  мм,  
кількість шарів – 4 553 шт.;

- змінний крок побудови з  
точністю 50 мкм,  
кількість шарів – 2 045 шт.

Скорочення технологічного часу  
побудови в 2,2 рази.

Допуск на виготовлення  
тестового виробу 50 мкм.

При використанні  
мінімального кроку, що  
дорівнює 0,025 мм, мо-  
дель виробу заввишки  
113,821 мм буде розділено  
на 4 553 шарів. При  
побудові тестового виро-  
бу з похибкою формоут-  
ворення, що дорівнює  
0,05 мм, кількість шарів

Рис. 7. Приклад вибору змінних товщин шарів на  
тестовій триангуляційній 3D моделі корпусу рубанка

буде дорівнювати 2 045, що суттєво скорочує час побудови виробу в 2,2 рази.

Технологічний час створення виробів пошаровим вирощуванням для більшості існуючих способів визначається залежністю

$$T_{Form} = T_{Home} + (T_{Add} + T_{Work}) + T_{End}, \quad (7)$$

де  $T_{Home}$  – підготовчі операції;  $T_{Add}$  – пошарова побудова додаткових технологічних елементів;  $T_{Work}$  – пошарове робоче формоутворення безпосередньо виробів;  $T_{End}$  – заключні операції.

Основну частину технологічного часу складає процес пошарової побудови виробу, який залежить безпосередньо від часу формоутворення окремих шарів. Товщина шару визначає відстань між січними площинами, що розділяють триангуляційну 3D модель виробу на двовимірні перерізи. Кількість шарів, товщина та площа їхньої поверхні в сукупності визначають час матеріалізації виробу.

При прогнозуванні часу формоутворення в попередніх роботах враховувалися 5 параметрів, які відносяться до характеристик 3D геометрії виробу:  $H_w$  – висота робочої області, зайнятої виробами з координатної осі  $OZ$ ;  $S_A$  – площа робочої області, зайнятої виробами;  $K_S$  – ймовірнісний коефіцієнт заповнення робочої області виробами;  $Y_A$  – ширина робочої області, зайнятої виробами по осі  $OY$ ;  $Y_A$  – ймовірнісний коефіцієнт розміру перерізу по осі  $OY$ .

Проведені дослідження показали, що на базі розробленої системи морфологічного аналізу можливо замінити ймовірнісні експертні оцінки

параметрів на їхні фактичні розрахункові характеристики безпосередньо по триангуляційній 3D моделі виробу. Це дозволяє більш достовірно прогнозувати технологічний час формування виробів генеративними технологіями.

Доведено, що розроблена система морфологічного аналізу дозволяє замінити ймовірнісні експертні оцінки параметрів на модельні статистичні характеристики для коефіцієнтів  $K_S$  та  $K_Y$ . Вибіркове значення коефіцієнта  $K_{Si}$  для кожного  $i$ -го перерізу визначається як відношення площі перерізу  $S_i$  до площі робочої області  $S_A$ , зайнятої виробами

$$K_{Si} = \frac{S_i}{S_A} \quad (8)$$

Вибіркове значення коефіцієнта  $K_{Yi}$  для кожного  $i$ -го перерізу визначається як відношення максимальної ширини робочої області перерізу  $Y_i$  до ширини робочої області  $Y_A$ , зайнятої виробами

$$K_{Yi} = \frac{Y_i}{Y_A} \quad (9)$$

Приклад прогнозування технологічного часу формування з урахуванням результатів морфологічного аналізу 3D моделі корпусу експериментального виробу (рис. 3) за технологією вибіркового лазерного спікання (SLS) представлено на рис. 8. Для розглянутого прикладу наводиться полігон розподілу



(для відносних значень, %) на базі фактичних розрахункових значень характеристик.

Порівняльні результати статистичного прогнозування загального часу формування корпусу експериментального виробу (табл. 1) для технології SLS показали, що фактичні розрахункові значення дозволяють

Рис. 8. Загальний час формування на установці пошарового вирощування з використанням модельних статистичних значень геометричних характеристик перерізів, год.

скоротити довірчий інтервал загального часу формування на установці з  $6 \div 12$  год. при рівні ризику 5,3% до  $7 \div 10$  год. при рівні ризику 5,1%.

Таблиця 1

### Порівняльні результати статистичного прогнозування загального часу формування вентилля (SLS)

Позначення	Од. вим.	Найменування	Статистичне прогнозування на базі ймовірнісних експертних оцінок параметрів	Статистичне прогнозування на базі модельних статистичних значень характеристик
$T_{Form}$	год.	Формування SLS	$6 \div 12$ при рівні ризику 5.3%	$7 \div 10$ при рівні ризику 5.1%

Практична реалізація розроблених підходів виконувалася при прийнятті рішень щодо виконання реальних замовлень ПрАТ «Верифікаційні моделі». Очікуваний річний економічний ефект від впровадження результатів роботи складає 35 тис. грн.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичне завдання підвищення ефективності інтегрованих генеративних технологій пошарового вирощування виробів на основі морфологічного аналізу електронних 3D моделей для забезпечення прийняття раціональних технологічних рішень на етапі, що передуює матеріалізації, та скорочення часових і трудових витрат на їх виготовлення.

1. Проведено аналіз сучасного стану і тенденцій розвитку інтегрованих генеративних технологій пошарового вирощування виробів в умовах високопродуктивного процесу. Виявлені шляхи підвищення ефективності інтегрованих генеративних технологій на базі дослідження електронних триангуляційних моделей промислових виробів.

2. Розроблено основні підходи до морфологічного аналізу триангуляційних 3D моделей складних виробів на базі застосування топологічного і морфометричного аналізів. Запропоновано систему узагальнених нормалізованих критеріїв та інтегральних характеристик, що дозволяє виконати оцінку якості триангуляційних моделей промислових виробів. Морфометричний аналіз геометричних характеристик триангуляційних 3D моделей дозволив прогнозувати технологічність конструкцій виробів. Топологічний аналіз на базі запропонованих диференціальних та інтегральних характеристик забезпечує верифікацію твердотільних моделей. У якості диференціальних характеристик доцільно використовувати суміжність ребер і вершин, а в якості інтегральних – загальну кількість вершин, ребер і граней; ейлерову характеристику і рід поверхні.

3. Розроблено і практично відпрацьовано методологію оцінки складності поверхонь промислових виробів на базі їх триангуляційних 3D моделей, що базується на застосуванні комплексного кількісного показника, який визначається як добуток інформаційних ентропій гаусової та середньої кривини поверхонь. Створену методологію доцільно використовувати при технологічній підготовці виробництва на етапі, що передуює матеріалізації.

4. Реалізовано систему морфологічного аналізу триангуляційних 3D образів виробів, що дозволяє досліджувати їхні топологічні, морфометричні і статистичні характеристики. Програмне забезпечення і практичні результати дисертаційної роботи передано до ПрАТ «Верифікаційні моделі» для забезпечення підтримки прийняття технологічних рішень на етапі, що передуює матеріалізації.

5. Виконані дослідження дозволили виявити особливості раціональної орієнтації виробів на платформі. Практичною цінністю для машинобудівної галузі є можливість одержання найбільш високої досяжної точності формоутворення виробів на базі вихідної триангуляційної 3D моделі. Виявлено, що при здійсненні поворотів виробу відносно осей координат забезпечується така орієнтація, за якої буде мінімізовано обсяг надлишкового матеріалу, що



утворюється на похилих поверхнях. Це досягається за рахунок максимізації площ поверхонь, перпендикулярних або паралельних вектору напрямку побудови виробу. Застосування генетичного алгоритму при вирішенні технологічного завдання автоматичного розміщення виробів на робочій платформі установки пошарового вирощування забезпечує одержання раціональних рішень, скорочуючи трудові й часові витрати при підготовці до матеріалізації.

6. Вибір змінного кроку побудови виробів на окремому етапі (кожне опускання робочої платформи установки) дозволяє регулювати точність виготовлення виробів. Це досягається за рахунок того, що при визначенні величини кроку побудови (товщини шару) враховується припустима величина погрішності формоутворення виробів. В результаті цього є можливість контролювати процес виготовлення виробів з погрішністю формоутворення в межах припустимої величини.

7. Застосування розробленої системи морфологічного аналізу 3D образів виробів і системи статистичного моделювання робочих процесів інтегрованих генеративних технологій забезпечує одержання більш точних результатів при прогнозуванні технологічного часу формоутворення виробів. При цьому знижується рівень невизначеності, а також часові і трудові витрати.

8. Практична реалізація розроблених підходів виконувалася при прийнятті рішень щодо виконання реальних замовлень ПрАТ «Верифікаційні моделі». Це забезпечило підтримку прийняття технологічних рішень на етапі, що передусе матеріалізації. Прийняття технологічних рішень базується на морфологічному аналізі комп'ютерних триангуляційних 3D моделей виробів і дозволяє знизити часові і трудові витрати при їх пошаровому виготовленні. Очікуваний річний економічний ефект від впровадження результатів роботи складає 35 тис. грн.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Абдурайимов Л.Н. Обобщенная модель времени полного цикла изготовления изделий генеративными технологиями макроуровня / А.И. Грабченко, В.Л. Доброскок, С.И. Чернышов, Л.Н. Абдурайимов // Високі технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХП», 2006. – Вип. 1(12). – С. 3-16.

*Здобувачем проведено аналіз впливу різних параметрів на час повного циклу виготовлення виробів інтегрованими генеративними технологіями пошарового вирощування виробів.*

2. Абдурайимов Л.Н. Особенности описания 3D образов изделий STL-файлами / В.Л. Доброскок, Л.Н. Абдурайимов, Я.Н. Гаращенко // Високі технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХП», 2006. – Вип. 1(12). – С. 159-164.

*Здобувачем розглянуті особливості STL-формату опису триангуляційних 3D моделей промислових виробів.*

3. 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.

4. Абдурайимов Л.Н. Рациональная ориентация изделий при их послойном формообразовании на базе исходной триангуляционной 3D модели / В.Л. Доброскок, Л.Н. Абдурайимов, С.И. Чернышов // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. Технические науки. – Симферополь: НИЦ КИПУ, 2010. – Вып. 24. – С. 13-21.

*Здобувачем визначені розрахункові залежності, що враховують кути, які утворюються між поверхнями виробів і напрямком побудови для підвищення точності формоутворення і зменшення припуску під остаточну обробку.*

5. Абдурайимов Л.Н. Критерии качества триангуляции 3D моделей промышленных изделий / В.Л. Доброскок, Л.Н. Абдурайимов, С.И. Чернышов // Сучасні технології в машинобудуванні. – Харків, НТУ «ХПІ», 2011. – Вип. 6. – С. 245-254.

*Здобувачем розроблена система узагальнених нормалізованих критеріїв оцінки якості триангуляційних 3D моделей виробів.*

6. Абдурайимов Л.Н. Интегральные характеристики триангуляционных 3D моделей изделий / В.Л. Доброскок, Л.Н. Абдурайимов, С.И. Чернышов // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков, НТУ «ХПИ», 2011. – Вып. 80. – С. 92-101.

*Здобувачем розроблена система інтегральних характеристик триангуляційних 3D моделей виробів.*

7. Абдурайимов Л.Н. Топологический анализ триангуляционных 3D моделей изделий / В.Л. Доброскок, В.А. Фадеев, Л.Н. Абдурайимов, С.И. Чернышов // Високі технології в машинобудуванні. – Харків, НТУ «ХПІ», 2011. – Вип. 1(21). – С. 74-86.

*Здобувачем проведено топологічний аналіз триангуляційних 3D моделей виробів на базі диференціальних та інтегральних характеристик, що дозволяє виконувати верифікацію твердотільних моделей.*

8. Абдурайимов Л.Н. Определение статистических характеристик триангуляционных моделей при прогнозировании времени формообразования изделий / В.Л. Доброскок, Л.Н. Абдурайимов // Вісник СевНТУ. – Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Вип. 129. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – С. 56-62.

*Здобувачем реалізований підхід до визначення статистичних геометричних характеристик перерізів триангуляційних 3D моделей, що дозволяє отримувати більш достовірні результати при прогнозуванні технологічного часу формоутворень виробів.*

9. Абдурайимов Л.Н. Оценка степени сложности поверхностей промышленных изделий на основе анализа их триангуляционных моделей / В.Л. Доброскок, Л.Н. Абдурайимов, Ю.Б. Витязев // Високі технології в машинобудуванні. – Харків, НТУ «ХПІ», 2012. – Вип. 1(22). – С. 94-107.

*Здобувачем розроблена методологія оцінки складності поверхонь промислових виробів з використанням комплексного кількісного показника, який визначається на базі морфологічного аналізу триангуляційних 3D моделей.*

10. Декл. пат. 46418 U УКРАЇНА, МПК В29С 35/08, В29С 41/02, G06F 17/50. Спосіб пошарової побудови виробів на базі вихідної триангуляційної 3D моделі /

Доброскок В.Л., Чернишов С.І., Вітязев 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.

*Здобувачем визначені розрахункові залежності вибору змінної величини кроку побудови виробів з урахуванням кутів нахилу складових їх поверхонь до напрямку побудови.*

11. Декл. пат. 54398 U УКРАЇНА, МПК В29С 35/08, В29С 41/02, G06F 17/50, G06F 19/00. Спосіб пошарової побудови виробів на базі вихідної триангуляційної 3D моделі / Абдурайімов Л.Н., Чернишов С.І., Доброскок В.Л., Вітязев Ю.Б.; заявник і патентовласник Нац. техн. ун-т «Харківський політехн. ін-т». – № u201004548; заявл. 19.04.2010; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 21.

*Здобувачем визначені особливості раціональної орієнтації виробів на робочій платформі для підвищення точності формоутворення і зменшення припуску під остаточну обробку.*

12. Абдурайімов Л.Н. Сравнительный анализ основных интерфейсов обмена данными между современными САД-системами 3D моделирования / Л.Н. Абдурайімов // Перспективы: сборник научных трудов молодых ученых. – Симферополь: КРП «Изд-во «Крымучпедгиз» – 2010. – Вып. 1. – С. 6-13.

13. Абдурайімов Л.Н. Прогнозирование технологичности создания изделий интегрированными технологиями послойного выращивания по их 3D моделям / В.Л. Доброскок, Л.Н. Абдурайімов // Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво: ІХ всеукраїнська молодіжна наук.-техн. конф., 26-77 лист. 2009 р.: тези доповідей. – Запоріжжя, 2009. – С. 144-146.

*Здобувачем розглянуті основні підходи до морфологічного аналізу 3D моделей промислових виробів при прогнозуванні технологічності створення виробів інтегрованими генеративними технологіями пошарового вирощування.*

14. Абдурайімов Л.Н. Особливості збереження інформації про колір 3D моделі виробу при її матеріалізації генеративними методами / Л.Н. Абдурайімов // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XVIII міжнародної науково-практичної конференції, Ч. III (12-14 травня 2010 р., Харків) / за ред. проф. Товажнянського Л.Л. – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – С. 105.

15. Abdurajimov L.N. Quality Criteria of the Triangulation 3D Models of Industrial Products / V.L. Dobroskok, Y.N. Garashchenko, L.N. Abdurajimov // Proceeding of 13th International Conference on Tools “ICT-2012”; Miskolc, Hungary, 27-28 March 2012. – P. 209-214.

*Здобувачем розроблена система узагальнених нормалізованих критеріїв оцінки якості триангуляційних 3D моделей виробів.*

16. Абдурайімов Л.Н. Створення триангуляційних 3D моделей виробів на основі аналітичного опису поверхонь / В.Л. Доброскок, Ю.Б. Вітязев, Я.М. Гарашенко, Л.Н. Абдурайімов // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XX міжнародної науково-практичної конференції, Ч. I (15-17 травня 2012 р., Харків) / за ред. проф. Товажнянського Л.Л. – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – С. 108.

*Здобувачем розглянута методика створення триангуляційних моделей*

*складних виробів, що складаються з базових геометричних 3D поверхонь.*

17. Абдурайімов Л.Н. Система морфологічного аналізу електронних 3D образів виробів / В.Л. Доброскок, Я.М. Гаращенко, Л.Н. Абдурайімов // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XX міжнародної науково-практичної конференції, Ч. I (15-17 травня 2012 р., Харків) / за ред. проф. ТОВАЖНЯНСЬКОГО Л.Л. – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – С. 109.

*Здобувачем визначені основні задачі при розробці системи морфологічного аналізу електронних 3D образів виробів.*

18. Абдурайімов Л.Н. Повышение эффективности интегрированных технологий послойного выращивания изделий путем морфологического анализа их 3D образа на этапе подготовки к материализации / В.Л. Доброскок, Л.Н. Абдурайімов // Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво: XII всеукраїнська молодіжна наук.-техн. конф., 22-25 жовт. 2012 р.: тези доповідей. – Київ, 2012. – С. 27-30.

*Здобувачем наведені основні положення морфологічного аналізу електронних триангуляційних моделей промислових виробів на етапі, що передуює матеріалізації.*

## АНОТАЦІЇ

**Абдурайімов Л.Н. Підвищення ефективності інтегрованих технологій пошарового вирощування виробів шляхом морфологічного аналізу їх 3D образу.** На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2013 р.

Дисертація присвячена підвищенню ефективності інтегрованих генеративних технологій пошарового вирощування виробів шляхом морфологічного аналізу їхніх електронних 3D моделей на етапі, що передуює матеріалізації.

В якості основних підходів до морфологічного аналізу запропоновано використовувати топологічні та морфометричні особливості твердотільних триангуляційних моделей. Для оцінки якості триангуляції 3D моделей розроблена система диференціальних та інтегральних критеріїв. Запропонована і розроблена методологія оцінки ступеня складності промислових виробів, що заснована на аналізі кривини їх поверхонь. Для підвищення точності прогнозування технологічного часу формування виробів інтегрованими генеративними технологіями запропоновано використовувати замість імовірнісних експертних оцінок технологічних параметрів (нечітких величин) їх фактичні статистичні характеристики, які отримані в системі морфологічного аналізу. На базі розроблених підходів створено оригінальне програмне забезпечення «Система морфологічного аналізу 3D образів виробів», що дозволяє приймати раціональні технологічні рішення на етапі підготовки до пошарового вирощування виробів. Практична реалізація розроблених підходів виконувалася при прийнятті рішень щодо виконання реальних замовлень ПрАТ «Верифікаційні моделі» (м. Харків).

Це забезпечило зниження часових та трудових витрат при пошаровому виготовленні виробів.

*Ключові слова:* інтегровані технології, пошарове вирощування виробів, морфологічний аналіз, 3D образ виробу, складність поверхонь, прогнозування часу матеріалізації.

**Абдурайимов Л.Н. Повышение эффективности интегрированных технологий послойного выращивания изделий путем морфологического анализа их 3D образа.** На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 – технология машиностроения. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2013 г.

Диссертация посвящена решению вопросов повышения эффективности интегрированных генеративных технологий послойного выращивания изделий на основе морфологического анализа их 3D образа.

Впервые выдвинута доказательная гипотеза о необходимости морфологического анализа 3D образа изделий для обеспечения принятия рациональных решений на этапе подготовки его к материализации. Для предметной области машиностроения морфологический анализ определяется как структурно-количественный анализ твердотельного изделия, рассматриваемого в виде системы элементарных поверхностных объектов, ограничивающих пространство тела. В качестве основных подходов к морфологическому анализу предложено использовать топологические и морфометрические особенности твердотельных триангуляционных моделей.

Рассмотрено современное состояние и тенденции развития интегрированных генеративных технологий послойного выращивания изделий в условиях высокопроизводительного процесса.

Для оценки качества триангуляции 3D моделей использовались 6 наиболее представительных дифференциальных и 2 интегральных критерия. Интервалы возможных значений критериев оценки качества приведены к единому нормализованному диапазону. Топологический анализ триангуляционных 3D моделей изделий на базе предложенных дифференциальных и интегральных характеристик позволяет выполнять верификацию твердотельных моделей.

Впервые выявлена взаимосвязь статистических характеристик триангуляционной 3D модели изделия с ее топологическими свойствами и уровнем эффективности материализации.

Предложена и разработана методология оценки степени сложности промышленных изделий, основанная на анализе кривизны их поверхностей. В качестве количественного показателя предложено использовать произведение информационных энтропий гауссовой и средней кривизны поверхности.

Для повышения точности прогнозирования технологического времени формообразования изделий интегрированными генеративными технологиями предложено использовать вместо вероятностных экспертных оценок технологических параметров (нечетких величин) их фактические статистические

характеристики, получаемые в системе морфологического анализа.

На базе разработанных подходов создано оригинальное программное обеспечение «Система морфологического анализа 3D образов изделий» на уровне готового программного продукта, позволяющее принимать рациональные технологические решения на этапе подготовки к послойному выращиванию изделий.

Практическая реализация разработанных подходов выполнялась при принятии решений по выполнению реальных заказов ЧАО «Верификационные модели», что обеспечило поддержку принятия технологических решений на этапе, предшествующем материализации. Принятие технологических решений базируется на морфологическом анализе компьютерных триангуляционных 3D моделей изделий и позволяет снизить временные и трудовые затраты при их послойном изготовлении. Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы составляет 35 тыс. грн.

*Ключевые слова:* интегрированные технологии, послойное выращивание изделий, морфологический анализ, 3D образ изделия, сложность поверхностей, прогнозирование времени материализации.

**Abdurayimov L.N. The effectiveness increase of computer-integrated technologies of the products layer growth by means of morphological analysis of 3D image.** Manuscript.

The Ph.D. thesis in Engineering Science on the specialty 05.02.08 – Engineering Technology. – National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”, Kharkov, 2013.

The Ph.D. thesis is devoted to the effectiveness increase of computer-integrated technologies of the products layer growth by means of morphological analysis of their 3D image at the stage of preparation for materialization.

As the main approaches to morphological analysis it is proposed to use topological and morphometric features of the solid triangulated models. For the quality estimation of the 3D models triangulation the system of differential and integral criteria was developed. The estimation methodology of complexity degree of industrial products is proposed and developed, which is based on the analysis of the curvature of their surfaces. To increase the accuracy of technological time predicting of products forming by integrated generative technologies it is proposed to use instead of probabilistic expert evaluation of process variables (fuzzy variables) their actual statistical data obtained in the system of morphological analysis. On the basis of the developed approaches the original software “The system of morphological analysis of 3D images of products” is created which allows to take rational technological solutions at the stage of preparation for the products layer growth. The practical implementation of the developed approaches was performed when taking decisions on the fulfilling real orders of PJSC “The verification models” (Kharkov), which provided reduction of time and labor cost during laywise manufacturing.

*Key words:* computer-integrated technologies, products layer growth, morphological analysis, 3D image of the product, the complexity of the surfaces, materialization forecast.

Підписано до друку 27.02.2013 р. Формат паперу 60×90/16.  
Папір офсетний. Друк – різнографічний. Умовн. друк. арк. 0,9.  
Гарнітура Times New Roman. Наклад 100 прим. Замовлення №119.

---

Віддруковано з готового оригінал-макету в ФОП Куртбедінова Д.А.  
Витяг о держреєстрації ААВ № 632373 від 22.01.2013 р.  
95000, АР Крим, м. Сімферополь, пров. Виробничий, 11