

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет транспорту та механічної інженерії

(повне найменування факультету)

Кафедра прикладної механіки та мехатроніки

(повна найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»**

**Дослідження процесу виготовлення деталі із
застосуванням методів реверсивної інженерії**

спеціальність 131 Прикладна механіка

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Прикладна механіка»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ІМм-21

Халик Євген Миколайович

(підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент

Сичук Віктор Анатолійович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

«__» _____ 20__ р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент

Четвержук Тарас Іванович

(підпис)

Луцьк – 2025 року

Луцький національний технічний університет

Факультет Транспорту та механічної інженерії
Кафедра Прикладної механіки та мехатроніки
Другий (магістерський) рівень
освітньо-професійної програми «Прикладна механіка»
Спеціальність 131 Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
_____ Р.Г. Редько
“ _____ ” _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Халик Євген Миколайович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження процесу виготовлення деталі із застосуванням методів реверсивної інженерії, керівник кваліфікаційної роботи магістра Сичук В.А. затверджені наказом вищого навчального закладу від «14» червня 2025 р., № 391/01-07.
2. Строк подання студентом роботи 1.12.2025 р.
3. Вихідні дані до роботи: документації: 3D сканер David laserscanner SLS-1, 3D принтер Creality Ender-3 V2, деталь складної форми (половина корпусу шуруповерта).
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
Вступ. РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. РОЗДІЛ 2 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ. РОЗДІЛ 3 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ. РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ. Висновок. Список використаних джерел.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Презентація

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Загальний	Сичук В.А.		
Конструкторський	Сичук В.А.		
Технологічний	Сичук В.А.		
Дослідний	Сичук В.А.		

7. Дата видачі завдання _____

Керівник _____

(підпис)

Завдання прийняв до виконання _____

(підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів виконання кваліфікаційної роботи магістра	Примітка
1.	Загальна частина.		
2.	Конструкторська частина.		
3.	Технологічна частина.		
4.	Дослідна частина.		
5.	Представлення роботи до захисту		
6.	Електронний варіант кваліфікаційної роботи магістра		

Студент _____

(підпис)

Халик Є.М.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____

(підпис)

Сичук В.А.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Халик Т.О. Дослідження процесу виготовлення деталі із застосуванням методів реверсивної інженерії. – Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра на здобуття кваліфікації другого (магістерського) рівня вищої освіти із спеціальності 131 Прикладна механіка спеціалізації технологія машинобудування. – Луцький національний технічний університет. – Луцьк, 2025.

Сутність роботи полягає у проходженні усіх етапів здійснення реверсивної інженерії. В якості дослідної деталі було обрано половину корпусу шурупверту. Дана деталь була просканована на 3D сканері. Потім скановані 3D моделі були опрацьовані та об'єднані в одне ціле. Згодом було створено 2 копії дослідної деталі. Перша копія була виготовлена на 3D принтері, а друга на фрезерному верстаті з ЧПК.

Ключові слова: 3D сканер, 3D принтер, реверсивна інженерія, фрезерний верстат з ЧПК.

ANNOTATION

Khalyk T.O. Research of the manufacturing process of a part using reverse engineering methods. - Manuscript.

Master's Qualification for Qualification of the Second (Master's) Level of Higher Education in Specialty 131 Applied Mechanics of Specialization mechanical engineering technology. - Lutsk National Technical University. - Lutsk, 2025.

The essence of the work is to go through all the stages of reverse engineering. Half of the screwdriver body was chosen as the experimental part. This part was scanned on a 3D scanner. Then the scanned 3D models were processed and combined into one whole. Subsequently, 2 copies of the experimental part were created. The first copy was made on a 3D printer, and the second on a CNC milling machine.

Keywords: 3D scanner, 3D printer, reverse engineering, CNC milling machine.

Зміст

Вступ.....	.....
РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНИЙ РОЗДІЛ.....	.....
1.1 Поняття реверсивної інженерії.....	.....
1.2 Реверсивна інженерія апаратного забезпечення.....	.....
1.3 Огляд процесу реверсивної інженерії.....	.....
1.4 3D-сканери для реверсивної інженерії.....	.....
1.5 Програмне забезпечення для реверсивної інженерії.....	.....
1.6 3D-принтери для реверсивної інженерії.....	.....
1.7 Висновки щодо розділу.....	.....
РОЗДІЛ 2 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	.....
2.1 3D сканування обраної деталі складної форми.....	.....
2.2 Опрацювання відсканованого матеріалу.....	.....
2.3 Висновки щодо розділу.....	.....
РОЗДІЛ 3 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	.....
3.1 Налагодження обробки деталі складної форми для 3D друку.....	.....
3.2 Налагодження обробки деталі складної форми для фрезерування на фрезерному верстаті з ЧПК.....	.....
3.3 Висновки щодо розділу.....	.....
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ.....	.....
4.1 Виготовлення дослідної деталі на 3D принтері.....	.....
4.2 Виготовлення дослідної деталі на фрезерному верстаті з ЧПК.....	.....
4.3 Висновки по розділу.....	.....
Висновок.....	.....
Список використаних джерел.....	.....

ВСТУП

Реверсивна інженерія сьогодні є одним із ключових інструментів сучасного машинобудування, адитивних технологій та мехатроніки. Вона дозволяє відтворити геометрію існуючих фізичних об'єктів, оптимізувати їх конструкцію, виготовляти високоточні копії та здійснювати модернізацію деталей, навіть за відсутності їхніх первинних креслень.

Актуальність теми магістерської роботи зумовлена широким впровадженням 3D сканерів, CAD/CAM систем та адитивних технологій у виробничі процеси.

Мета роботи полягає у проведенні повного циклу реверсивної інженерії деталі: від 3D сканування та цифрової обробки сканів у CAD-середовищі до виготовлення фізичного зразка на 3D-принтері та фрезерному верстаті з числовим програмним керуванням.

Об'єкт дослідження – деталь, що підлягає копіюванню та виготовленню за технологією реверсивної інженерії.

Предмет дослідження – процеси 3D сканування, обробки сканів у CAD-системах, формування цифрової моделі та відтворення деталі методами 3D-друку та механічної обробки на ЧПК-обладнанні.

Методи дослідження включають: 3D сканування об'єкта, обробку полігональної моделі в спеціалізованих CAD-програмах, створення параметричної моделі деталі, підготовку G-коду для 3D-друку та фрезерної обробки, а також експериментальне виготовлення деталі на 3D-принтері та ЧПК-верстаті.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в комплексному дослідженні та практичній реалізації повного технологічного циклу реверсивної інженерії з порівнянням точності та якості результатів при використанні адитивних та субтрактивних методів виготовлення.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні методики відтворення деталей за допомогою 3D-сканування та CAD-

модельовання, а також у виготовленні фізичних зразків, які можуть бути застосовані у машинобудуванні, ремонті, модернізації та навчальному процесі.

Особистий внесок здобувача полягає у виконанні всього комплексу робіт: цифрового сканування деталі, обробки отриманої геометрії, побудови CAD-моделі, підготовки технології виготовлення та виготовлення деталі на 3D-принтері і фрезерному верстаті з ЧПК.

Апробація результатів дослідження здійснювалася на науково-практичних семінарах кафедри, де було представлено основні підходи, методологію та результати виготовлення деталі на основі реверсивної інженерії.

Структура та обсяг роботи. Магістерська робота містить вступ, 4 розділи, висновки та список використаних джерел. Робота викладена на ___ сторінках машинописного тексту, містить ___ рисунків та ___ таблиць. Список використаних джерел включає ___ найменувань.

1 ЗАГАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Поняття реверсивної інженерії

Для чіткого розуміння та опанування інформацією варто проаналізувати матеріали викладені за посиланням [1].

Реверсивна інженерія — це процес розбирання та дослідження продукту для виявлення концепцій його виготовлення з метою створення аналогічного продукту або вдосконалення існуючого.

Хоча це загальноприйняте визначення реверсивної інженерії, існує багато інших причин для використання підходу реверсивної інженерії. Інновації часто виникають лише з незначного налаштування або доповнення до готового продукту: у хімії для створення нових молекулярних сполук або вакцин, в електроніці для реплікації друкованих плат, а в розробці програмного забезпечення для відтворення прошивки, архітектури серверної частини та інтерфейсів користувача.

Завдяки таким технологіям, як 3D-сканери та інструменти цифрового виготовлення, такі як 3D-принтери, (реверс) інженери мають у своєму розпорядженні кращі інструменти, ніж будь-коли раніше.

Законність реверсивної інженерії

Згідно із Законом про захист комерційної таємниці, реверсивна інженерія загалом є законним для отримання комерційної або військової переваги над конкурентами, за умови, що це робиться без порушення договірних угод та після отримання оригінального продукту відповідно до закону.

Це вважається законним способом розкриття комерційної таємниці, відмінним від крадіжки чи шпигунства, за умови, що це не перешкоджає патентному захисту, ліцензуванню кінцевих користувачів чи іншим договірним зобов'язанням.

Однак у деяких випадках конкуренти, які копіюють продукцію, можуть мати серйозні наслідки для бізнесу виробника оригінального обладнання, і

компанії часто вживають активних заходів, щоб запобігти потраплянню своєї продукції в чужі руки.

1.2 Реверсивна інженерія апаратного забезпечення

Причини для реверсивної інженерії механічних деталей різноманітні.

Додаткові компоненти: Під час розробки продукту існуючі компоненти часто переробляються для створення додаткових або неоригінальних елементів, налаштувань, ремонту або для їх інтеграції в нову збірку.

Удосконалення продукту: Існуючі компоненти можуть бути розібрані, проскановані та ретельно досліджені для покращення процесів їх виробництва та складання. Зниження витрат може відбуватися такими способами:

- Послаблення геометричних розмірів, допусків та обмежень.
- Зниження маси шляхом оптимізації структурної геометрії, такої як ребра, товщина стінок, радіуси та інші переходи.

- Перепроєктування з урахуванням змін у виробничому процесі для полегшення складання, розбирання, формування, інтеграції функцій або обробки після закінчення терміну служби.

- Удосконалення ключових функціональних характеристик, ергономіки та зручності використання.

- Покращення характеристик продукту, таких як загальна міцність, елементи замикання, рухомі шарніри, точки кріплення електронних компонентів, довговічність та захист від проникнення (IP) для водо- та пилонапроникності.

Поштовх до інновацій: Розбирання існуючих пристроїв для детального розуміння їхньої внутрішньої роботи та конструктивного задуму може стати поштовхом для радикальних інновацій.

Перегляд інженерних викликів минулого виключає необхідність винаходити велосипед. Галузь біомікрії примітна саме цим, де досліджувалися такі біологічні системи, як лапи коників, лапи геконів,

гідродинаміка китів, поведінка мурашиних колоній, лапи креветок, павутиння та формування мушель амонітів, як вхідні дані для нових винаходів.

Розбираючи існуючі пристрої, компанії також можуть дізнатися про компоненти «під капотом» продуктів конкурентів та про те, як вони були зібрані. Потім вони можуть використовувати цю інформацію, щоб оцінити, чи дійсно компанія забезпечує найкраще співвідношення ціни та якості, і де вони можуть покращити рівень інтеграції ланцюга поставок та бізнес-стратегію.

Відродження: Якщо виробник оригінального обладнання збанкрутує, не опублікувавши жодних креслень чи даних САД, зворотне проектування є найкращим методом для відновлення втрачених елементів. Наприклад, антикварні або ретро-автомобілі, у яких закінчилися постачальники запасних частин, можна знову використовувати завдяки зворотному проектуванню важливих підсистем, таких як двигуни, коробки передач та трансмісії.

Реверсивна інженерія також є чудовим способом повернути зняті з виробництва лінійки продуктів із закінченим терміном дії патентного захисту, які колись були популярними, та модифікувати їх для обслуговування сучасної аудиторії.

Реверсивна інженерія також служить історичним цілям, створюючи цифровий архів давно втрачених об'єктів. Компанії, які мають лише фізичні екземпляри продуктів, які вони виготовляли до появи комп'ютерів та САПР, тепер можуть відтворити ці втрачені елементи, створюючи цифрових двійників, і таким чином зберегти повну свою продуктову спадщину недоторканою.

Підробки: Найменш етично обґрунтованим застосуванням зворотної інженерії є поширена практика копіювання, яку ми спостерігаємо сьогодні у всьому світі, для створення реплік, часто спрощених, незграбно перейменованих або непропорційно великих, найпопулярніших продуктів.

Хоча в багатьох випадках це пов'язано з порушенням патентних прав і має бути вжито судових заходів, з позитивного боку це також можна розглядати як комплімент оригінальним розробникам і прийнятний спосіб

поширення дизайну на ринки, які не охоплені обсягом розповсюдження та інтелектуальною власністю оригінального винахідника.

Ось кілька прикладів застосування реверсивної інженерії в різних індустріях:

- Автомобільна промисловість ----- бампери, дахи, аеродинамічні модифікації, моделі автомобілів, випускні колектори, запасні частини, оцифрування глиняних моделей;
- Біомедична інженерія ----- анатомічні моделі, імплантати, хірургічні інструменти, протези, ортопедія;
- Споживчі товари ----- додаткові компоненти, прототипи, упаковка;
- Машинобудування ----- запасні частини, вдосконалення деталей, ціннісна інженерія, переобладнання машин, аналіз відмов;
- Меблі ----- орнаментация, ніжки, молдинги, оздоблення, запасні частини;
- Ювелірні вироби ----- репліки, форми, вироби, виготовлені на замовлення, консервація.

1.3 Огляд процесу реверсивної інженерії

Точний процес реверсивної інженерії залежить від типу об'єкта.

Реверсивна інженерія апаратного забезпечення – це чотириетапний процес. Він відбувається у зворотному порядку порівняно зі звичайними процесами розробки нового продукту. Реверсивна інженерія починається з готового продукту, а потім виводить вимоги, які зумовили його розробку.

Методологія зазвичай виконує наступні кроки:

1. Збір даних: 3D-сканер калібрується, а сцена налаштовується для отримання оптимальних результатів з точки зору фону та освітлення. В результаті створюється хмара точок розміром до кількох гігабайт. Часто недостатньо лише оцифрувати модель; реверс-інженери також хочуть дізнатися з перших вуст про задум дизайну та особливості складання, розібравши виріб та піддавши його різноманітним тестам.

2. Післяобробка: Вихідна хмара точок перетворюється на концептуальну сітчасту модель. Більшість програмних інструментів пропонують автоматичні функції, але все ще можуть вимагати ручного заповнення прогалів та видалення нерівностей. Мета цього кроку — вивчити та розбити поточну систему та її складові компоненти.
3. Моделювання: Сітчасте представлення об'єкта перетворюється на параметричну модель на основі твердих тіл та поверхонь. Тепер ми повертаємося від рівня реалізації, щоб відновити основний задум проектування. На цьому етапі інженери можуть легко змінювати розміри та додавати покращення.
4. Перевірка: Цей етап включає порівняння розмірів між скануванням та отриманим відтворенням. Згодом він передбачає перевірку, створення прототипів, тестування та ітерації в різних сценаріях, щоб переконатися, що продукт, отриманий за допомогою реверсивної інженерії, відповідає новим вимогам.

Реверсивна інженерія суттєво відрізняється від прямого проектування. Оскільки ми працюємо у зворотному напрямку з існуючої реалізації, перероблений продукт ніколи не буває на 100% точним, відповідає специфікаціям або «правильно» змодельованим з точки зору процедур САПР.

Оскільки реверсивна інженерія за своєю суттю неточне в розмірах, неоднозначне в інтерпретації та дивне в побудові поверхні, нам доводиться задовольнятися максимально близьким наближенням. За дуже короткий час ми все ще можемо створювати значну величину з корисними деталями, які зайняли б у 10-100 разів більше ресурсів, якби розроблялися з нуля. Це інший спосіб мислення, ніж перспективна розробка, яка зазвичай характеризується прагненням до досконалості.

1.4 3D-сканери для реверсивної інженерії

Існує низка доступних методів перетворення фізичного об'єкта на його цифрового двійника. 3D-сканери (рис. 1.1) є найпоширенішим пристроєм захоплення зображень і бувають різними у виконанні.

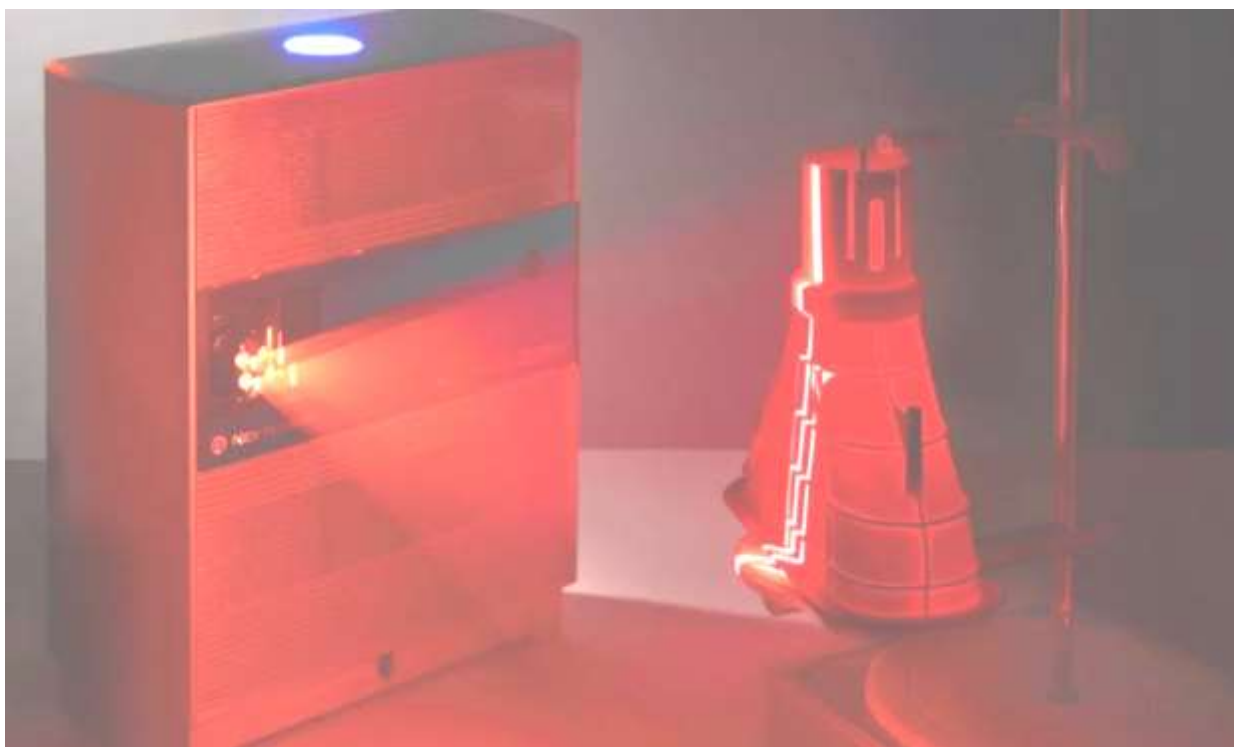


Рисунок 1.1 – 3D-сканер є найпоширенішими пристроями захоплення для реверсивної інженерії.

Сканери структурованого світла проєктують світловий візерунок на об'єкт і використовують дві камери для фіксації того, як об'єкт деформує світло. Отримані зображення об'єднуються в 3D-зображення.

Деякі відомі моделі початкового рівня, які зазвичай використовуються в портативних та неінвазивних медичних застосуваннях, включають Shining3D Einstar, Creality CR-Scan Lizard та Structure Sensor Pro. Однак до заявлених рівнів точності слід ставитися з певною долею скептицизму; середнє відхилення для цих типів пристроїв становить приблизно 1%.

Більш просунуті рішення для сканування включають ручні 3D-сканери Peel3D, Calibry та Artec Eva. Вони мають вищу точність, вбудоване програмне

забезпечення для обробки та зворотний зв'язок у режимі реального часу для керування процесом сканування, а також різні режими, включаючи сканування на основі наклеєних маркерів. Це чудово підходить для плоских об'єктів розміром до кількох метрів. Однак підвищення якості зазвичай супроводжується експоненціальним зростанням ціни.

Лазерні триангуляційні сканери вистрілюють мільйони лазерних точок на секунду на цільовий об'єкт, який зазвичай потребує посилення маркерами. Для непрозорих деталей з дрібними деталями, такими як філігранні сітки, опуклі поверхні та ґратчасті структури, ця категорія 3D-сканерів є найкращим вибором.

Популярні продукти, такі як 3D-сканер Matter and Form, Creaform HandyScan, Zeiss T-Scan Hawk та FARO Freestyle, можуть сканувати цілі транспортні засоби. Для складних проектів сканування професіонали часто використовують гібридний метод, використовуючи як портативну систему, так і стаціонарну безконтактну скануючу руку.

Для початківців-ентузіастів, які можуть погодитися компенсувати недосконалість своїх сканів за допомогою своїх потужних можливостей реверсивної інженерії САПР, існують деякі низькобюджетні альтернативи.

Інфрачервоні камери глибинного зондування та датчики LiDAR забезпечують менш точні моделі сітки, але в деяких випадках все ще можуть бути задовільними для простого сканування та можуть бути знайдені мобільних телефонах та мобільних планшетах.

Фотограмметрія базується на звичайній фотографії, де реверс-інженер має зробити послідовність зображень з різних ракурсів навколо об'єкта. Потім процес спирається на ресурсоємне програмне забезпечення, таке як Meshroom, RealityCapture, Regard3D, Trnio, RecFusion або Zephyr, для об'єднання зображень у 3D-реконструкцію.

Незважаючи на перевагу того, що деякі програми доступні безкоштовно, для отримання робочих моделей з фотограмметрії потрібно трохи більше навичок і терпіння, незалежно від застосування.

1.5 Програмне забезпечення для реверсивної інженерії

Відносна простота робочого процесу перетворення 3D-сканування в САПР часто залежить від арсеналу окремих програмних інструментів, які мають різний ступінь сумісності. Однак, щоб оптимізувати процес, найкраще вибрати програмне рішення, яке проведе реверсивну інженерію від отримання необроблених даних сканування до повної високоякісної реконструкції оригінального проекту.

Найкращі програмні інструменти для реверсивної інженерії завантажують хмару точок у різних форматах, таких як .ply, .asc, .ptx, .pcg (Autodesk), .e57, .xyz, .fls (Faro), .pcd, .las та .obj. Ці програми автоматично генерують та автоматично відновлюють результуючий сітчастий об'єкт, а також пропонують безліч інтелектуальних інструментів для реконструкції NURBS-поверхонь відповідно до сітки. Це позбавляє необхідності вимірювати кожен дрібну деталь штангенциркулем для її ручної реконструкції, як це було до появи 3D-сканування.

Деякі віртуальні дизайн-студії навіть дозволяють користувачам готувати результат безпосередньо для прототипування за допомогою ЧПК, 3D-друку або лиття. А оскільки десята частка міліметра може мати вирішальне значення для того, як дві виготовлені деталі з'єднуються одна з одною, точність є ключовою протягом усього процесу реверсивної інженерії.

Щоб забезпечити точність, інструмент реверсивної інженерії повинен вміти виконувати наступне:

- Перевірка на перетини, щоб забезпечити плавну роботу деталей разом у збірці та щільне прилягання зовнішніх компонентів.
- Аналіз товщини стінки для оптимізації сформованості та полегшення конструкції.
- Аналіз ухилу для забезпечення правильних кутів ухилу, запобігання підрізам та перевірки ліній роз'єму.

- Аналіз поверхні, такий як зброва смуга та контроль кривизни, забезпечує придатність для великих складних форм, таких як ті, що потрібні в споживчих товарах та автомобільній промисловості.

- Перевірка розмірів, таких як маса, об'єм та габаритна рамка.

Приведемо деякі з найкращих варіантів, коли йдеться про найкращі програмні інструменти для реверсивної інженерії.

Mesh2Surface

Mesh2Surface — це комплексне рішення, яке дозволяє розробникам продуктів конвертувати хмару точок безпосередньо в сітку для реверсивної інженерії в Rhinoceros або SolidWorks.

Потім 3D-дизайнер може витягувати опорні площини та точки на сітці, щоб вони відповідали складній геометрії. Mesh2Surface (рис. 1.2) містить інтелектуальні інструменти для створення 3D-ескізів, поперечних перерізів та контурів. Він забезпечує аналіз відхилень, автоматичне створення поверхонь з налаштуваннями точності та можливість моделювання найкраще підходящих поверхонь вільної форми.

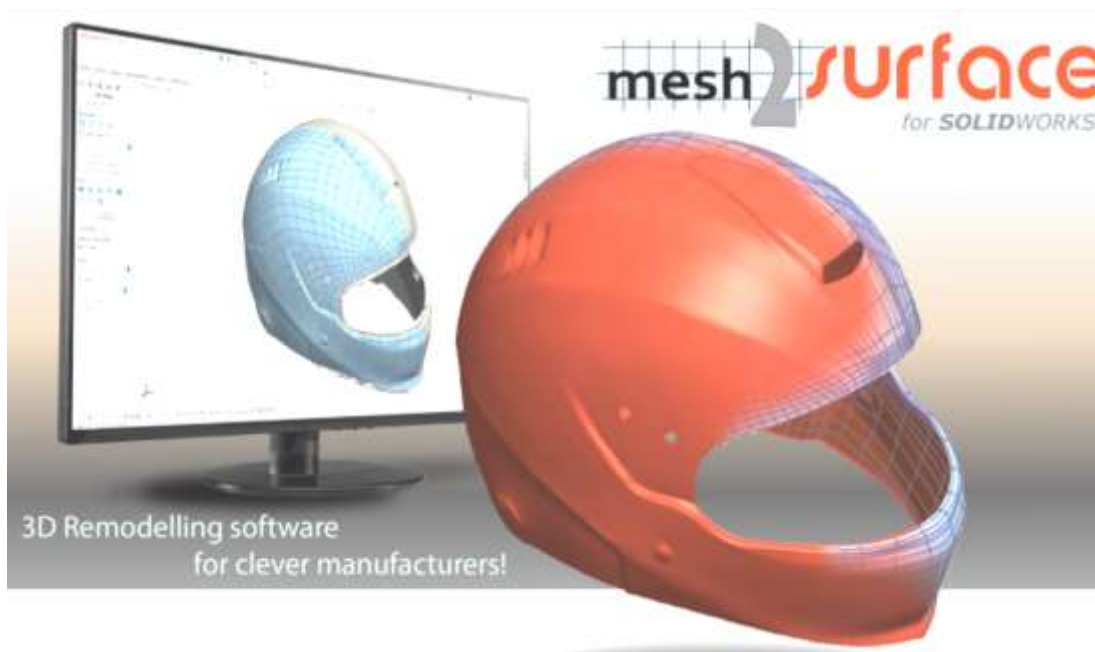


Рисунок 2.1 – Mesh2Surface чудово справляється зі створенням об'єктів складної форми

Artec Studio

Artec – ще один претендент на лідерство серед інструментів для реверсивної інженерії апаратного забезпечення. Він зосереджений на простоті використання та може похвалитися максимальною швидкістю процесу перетворення сканування в САПР. Оскільки програмне забезпечення забезпечує зворотний зв'язок у режимі реального часу про рух пристрою та навіть дозволяє накладати кілька сканувань для більш повної інтеграції даних, весь автомобіль можна оцифрувати приблизно за 15 хвилин.

Навіть попри те, що Artec не пропонує повноцінного CAD-досвіду, користувачі все ще можуть створювати точні моделі, використовуючи примітивну підгонку, першокласні алгоритми відстеження текстур та геометрії, а також інструмент «Автоматична поверхня», який перетворює органічні форми на твердотільні моделі.

Artec Studio (рис. 1.3) також включає режим автопілота, який автоматизує значну частину процесу моделювання.

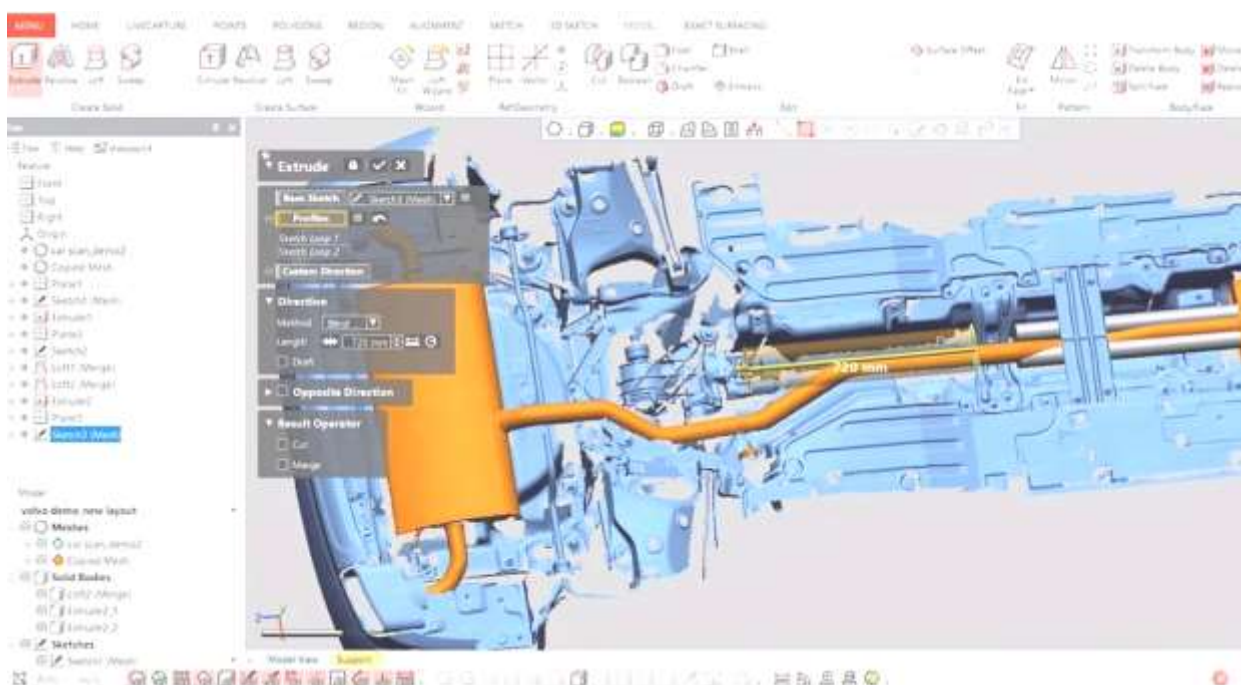


Рисунок 1.3 – Artec Studio дозволило компанії з реверс-інжинірингу виконати 3D-сканування та відтворення деталей днища Volvo XC90 менш ніж за годину для розробки нової вихлопної системи.

Fusion 360

Autodesk Fusion 360 – один із популярних інструментів реверсивної інженерії. Це хмарна САПР-система, яка пропонує проміжне рішення, оскільки може обробляти лише легкі сітки та пропонує обмежений набір геометричних операцій порівняно з лідерами галузі.

Fusion (рис. 1.4) пропонує різні методи для робочого процесу «сітка-твердотільна модель», такі як отримання контурів у робочому просторі «Сітка». Він також має численні інструменти аналізу для моделювання напружень та топологічної оптимізації у своїх різних робочих середовищах. Завдяки інтеграції з Meshmixer, він також надає все більш надійні інструменти для ремонту сіток.

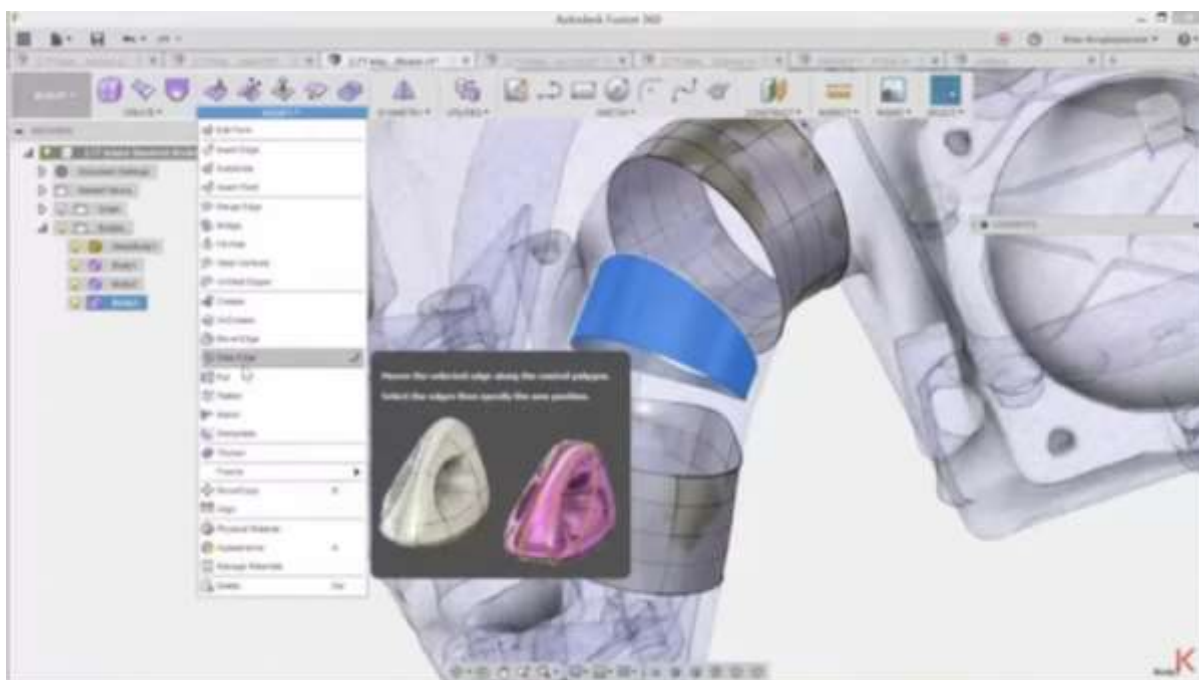


Рисунок 1.4 – Fusion 360 – це чудове рішення середнього рівня, яке містить широкий арсенал інструментів полігонального моделювання для підбору геометрії сітки.

Geomagic Design X

Geomagic (рис. 1.5) – це найкраще рішення для перетворення даних 3D-сканування на CAD-моделі на основі елементів. Точна реконструкція

гарантується шляхом трасування контурів на основі різних ділянок сітки. Вибір пензлем дозволяє включати та виключати певні області для різних кроків процесу реконструкції. Він також пропонує потужну функцію автоматичної поверхні, яка позбавляє інженерів деяких клопотів.

Більше того, інтерфейс користувача здається знайомим, оскільки він нагадує SolidWorks. Фактично, інструмент «Live Transfer» дозволяє дизайнерам експортувати дерево історії до спеціалізованого середовища CAD-моделювання, такого як NX, Creo, Inventor, Pro/Engineer та SolidWorks.

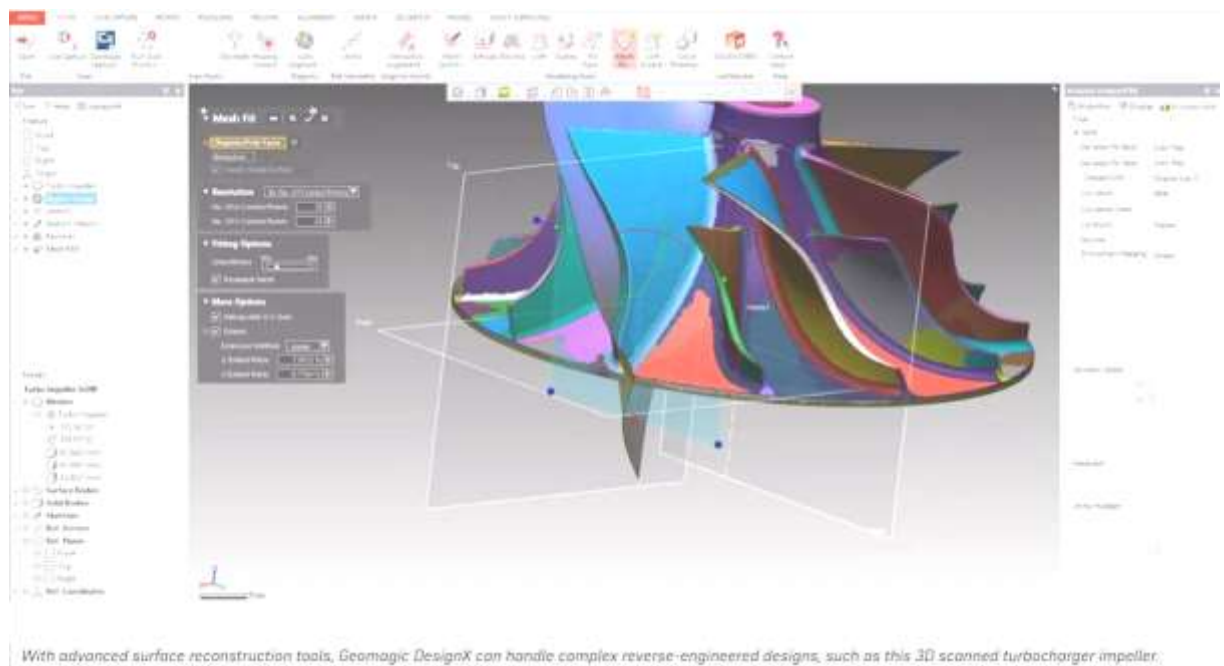


Рисунок 1.5 – завдяки передовим інструментам реконструкції поверхні, Geomagic DesignX може обробляти складні конструкції, розроблені методом реверсивної інженерії, таку як представлене 3D-скановане зображення крильчатки турбокомпресора.

Xtract3D

Для дизайнерів та інженерів, які віддають перевагу роботі з реверс-інжинірингом у межах SolidWorks, Xtract3D є незамінним плагіном. Він дозволяє безпосередньо імпортувати сітки або дані хмар точок, але оскільки

він здебільшого орієнтований на простішу геометрію, це легка альтернатива потужнішим пакетам реверс-інжинірингу.

Тим не менш, його інструменти заслуговують на похвалу. Xtract3D (рис. 1.6) надає користувачеві потужні інструменти для нарізання, підгонки ескізів та прив'язування. Це дозволяє дизайнерам легко трасувати прямо поверх 2D-перерізів даних 3D-сканування для створення параметричних моделей.

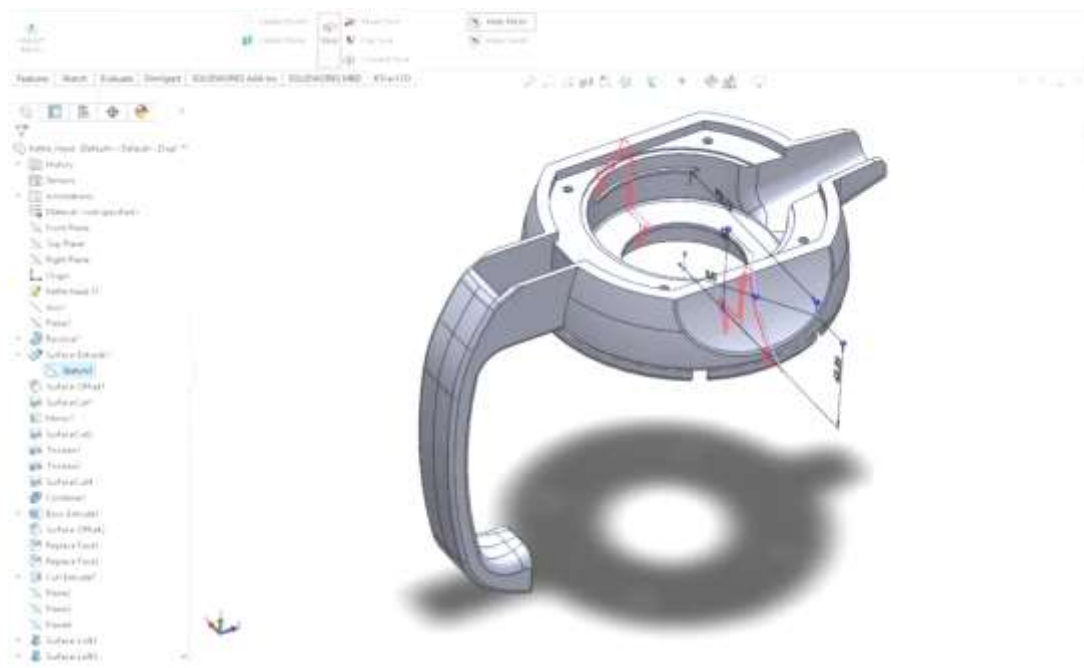


Рисунок 1.6 – Xtract3D для SolidWorks пропонує достатньо функціональності для відтворення споживчих продуктів, таких як представлена головка чайника, на основі даних 3D-сканування.

Ansys SpaceClaim

SpaceClaim — це відомий та інноваційний пакет САПР з розширеними можливостями реверсивної інженерії. Це найкраще рішення для розробників прямого моделювання, які надають перевагу свободі та швидкості, а не складнощам жорсткого визначення геометрії в середовищах параметричного моделювання на основі дерева історії.

Інтелектуальні функції, такі як ідентифікація ознак, поверхня та маніпулювання методом push/pull, роблять SpaceClaim особливим

інструментом, коли справа доходить до оптимізації робочого процесу реверсивної інженерії. У процесі реконструкції програмне забезпечення автоматично виявляє потрібні операції моделювання та пропонує оптимальне ремоделювання для отримання високоточних результатів. Більше того, працюючи зі SpaceClaim (рис. 1.7), інженери можуть легко пов'язувати свою модель з іншими модулями Ansys, такими як модулі для CFD або механічного моделювання.

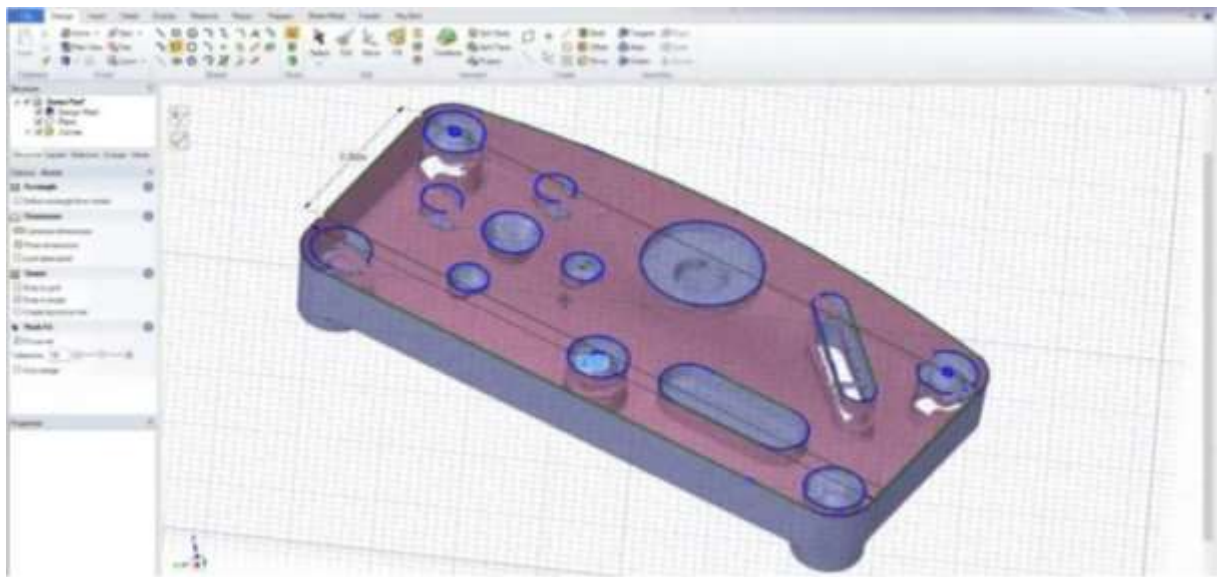


Рисунок 1.7 – SpaceClaim автоматично виявляє об'єкти та прив'язує нову геометрію до вихідної сітки для швидкого та точного ремоделювання.

Tebis Reverser

Tebis пропонує спеціалізоване середовище реверсивної інженерії для автомобільних дизайнерів. Воно було розроблено у співпраці з BMW Design Group для спрощення робочого процесу «Clay-to-CAD». Таким чином, дизайнери можуть просунути процес ручного проектування далі, перш ніж перейти до 3D.

Програмний пакет Reverser (рис. 1.8) аналізує дані сітки та дозволяє дизайнерам створювати каркасну структуру, яка потім використовується для генерації окремих поверхонь. Ці поверхні потім аналізуються та згладжуються до якості класу A відповідно до галузевого стандарту.

Окрім надання безлічі параметрів ручного керування, поверхні можна автоматично розраховувати та переходи контролювати дуже детально, без необхідності для користувача мати глибокі знання. Технологія асоціативних поверхонь утримує сітку та згенеровані поверхні пов'язаними, щоб забезпечити тангенціально постійні переходи та плавні переміщення поверхонь.

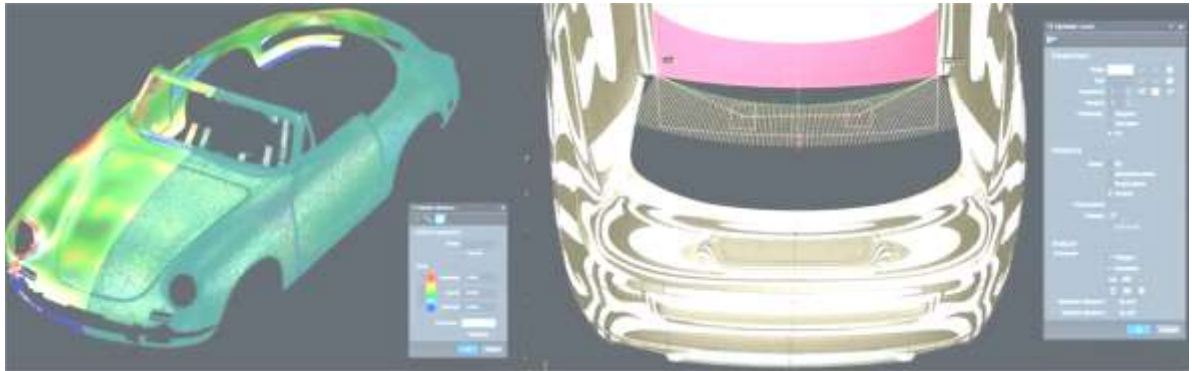


Рисунок 1.8 – Tebis Reverser — це надійне рішення для створення високоякісних моделей поверхні з 3D-сканів транспортних засобів.

PTC Creo

Creo — це пакет параметричного моделювання, що підходить для роботи зі збірками з понад 1000 деталей. Він набирає популярності як у секторі споживчих товарів, так і в секторі мобільності, і його використовують такі провідні компанії галузі, як Aston Martin, John Deere, Volkswagen, Toyota та Amazon.

Професійні інженери отримають вигоду від інвестування в пакет Advanced Plus, який включає розширену обробку поверхонь, 3D-друкарський зріз, проектування прес-форм та моделювання.

PTC також випустила розширення Reverse Engineering Extension як для Pro/Engineer, так і для його професійної версії Creo. Після імпорту даних хмари точок та створення сітки фасетів її можна очистити, а її елементи моделювання автоматично витягти за допомогою функції Restyle. Creo (рис. 1.9) також

пропонує потужні інструменти синтезу та аналізу для створення високоточної моделі з безперервною кривизною.

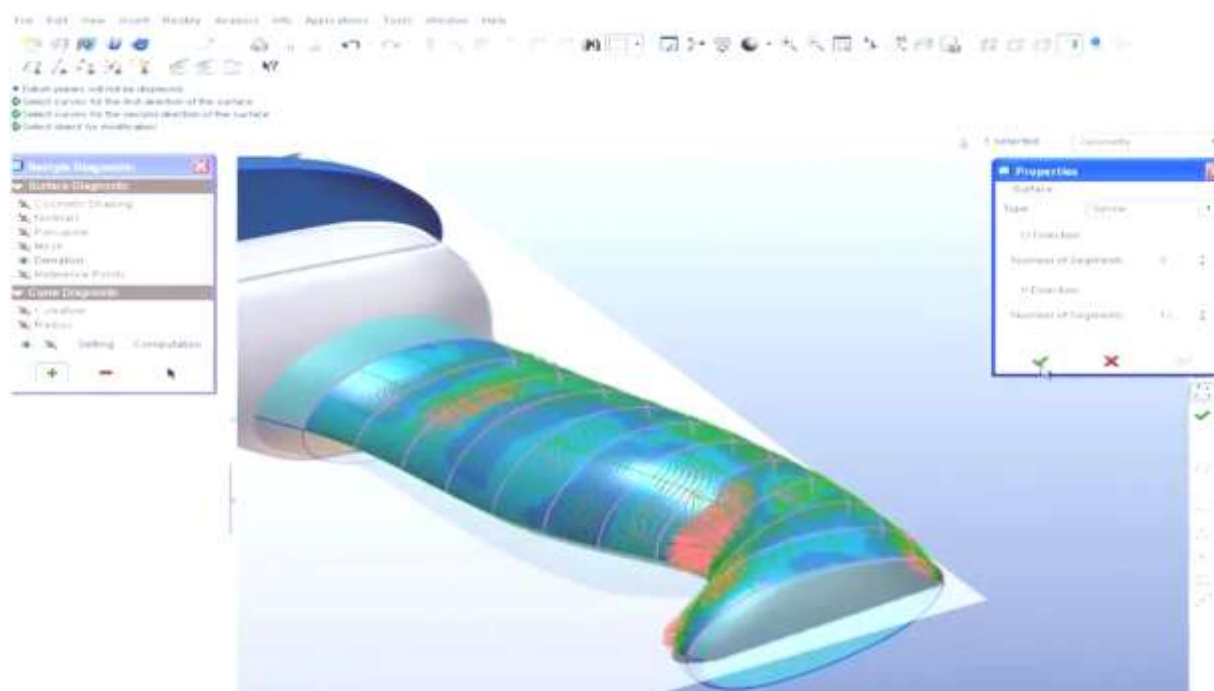


Рисунок 1.9 – розширення для реверсивної інженерії для Creo та Pro Engineer пропонує розширені інструменти для професійних та точних результатів

VXElements

Пакет VXElements від Creaform пропонує набір модулів для робочого процесу сканування в CAD. Найбільш помітним є програмне забезпечення VXModel, яке виступає віртуальним помічником для перетворення необроблених даних сітки на високоякісну твердотільну модель.

Основними особливостями програми є інструменти автоматичного та ручного формування поверхонь, функція очищення сітки, вирівнювання прив'язки, логічні операції об'єднання, а також можливість вилучення та редагування меж і поперечних перерізів. VXModel (рис. 1.10) також має функцію експорту 3D-друку та надає можливість безпосередньо передавати моделі реверсивної інженерії в Inventor, SolidWorks та SolidEdge для подальшої обробки.



Рисунок 1.10 – VXModel пропонує широкий арсенал інструментів для реверсивної інженерії

1.6 3D-принтери для реверсивної інженерії

Завдяки 3D-друку деталей, отриманих методом реверсивної інженерії, дизайнери отримують глибоке розуміння всіх характеристик і параметрів, що сприяють успіху їхнього творіння. Більше того, це дозволяє їм проходити швидкі цикли вдосконалення та навіть друкувати деталі кінцевого використання на 3D-принтері.

3D-принтери зі стереолітографією (SLA) використовують лазер для затвердіння рідкої смоли в затверділий пластик у процесі, який називається фотополімеризацією. SLA-деталі мають найвищу роздільну здатність і точність, найчіткіші деталі та найгладшу поверхню серед усіх технологій 3D-друку пластиком, а SLA-друк також пропонує найширший спектр матеріалів.

SLA – чудовий варіант для високодеталізованих прототипів, що вимагають жорстких допусків і гладких поверхонь, таких як форми, шаблони та функціональні деталі. SLA широко використовується в різних галузях промисловості, від інженерії та дизайну продукції до виробництва, стоматології, ювелірних виробів, моделювання та освіти.

Настільні SLA-3D-принтери (рис. 1.11), такі як Formlabs Form 3+, пропонують потужне, але доступне рішення для більшості проектів реверсивної інженерії, тоді як великі принтери на смолах, такі як Formlabs Form 3L, можуть підтримувати навіть найбільші проекти.



Рисунок 1.11 – Настільні SLA 3D-принтери ідеально підходять для перетворення реверсивно-інжинірингових конструкцій на фізичні деталі.

Селективне лазерне спікання – найпоширеніша технологія адитивного виробництва для промислового застосування, якій довіряють інженери та виробники з різних галузей промисловості завдяки її здатності виготовляти міцні та функціональні деталі.

3D-принтери SLS (рис. 1.12) використовують потужний лазер для сплавлення дрібних частинок полімерного порошку. Несплавлений порошок підтримує деталь під час друку та усуває потребу в спеціальних опорних конструкціях. Це робить SLS ідеальним для складних геометрій, включаючи внутрішні елементи, піднутрення, тонкі стінки та негативні елементи. Деталі, виготовлені за допомогою SLS-друку, мають чудові механічні характеристики, міцність яких нагадує міцність деталей, виготовлених методом лиття під тиском.

Поєднання низької вартості на деталь, високої продуктивності та перевірених матеріалів робить принтери SLS, такі як Fuse Series від Formlabs, популярним вибором серед інженерів для функціонального прототипування та економічно ефективною альтернативою лиття під тиском для виробництва обмежених серій.



Рисунок 1.12 – 3D-принтери SLS ідеально підходять для реверсивного інжинірингу складних геометрій.

1.7 Висновки щодо розділу

Проаналізувавши вище приведену інформацію було прийнято рішення провести усі необхідні етапи для виконання реверсивної інженерії деталі яка має складну форму (яку практично неможливо обміряти класичними методами вимірювання). Тобто над деталлю потрібно провести наступні дії:

- 3D сканування;
- опрацювати отриману цифрову копію деталі;
- здійснити налагодження для 3D друку копії деталі та безпосередньо її виготовити;
- здійснити налагодження для фрезерування деталі на фрезерному верстаті з ЧПК та безпосередньо її виготовити.

2 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 3D сканування обраної деталі складної форми

В якості деталі з складною формою, яка буде дослідною для здійснення дій щодо реверсивної інженерії, зробимо вибір на половину корпусу від шуруповерта, який представлений на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Обрана деталь для проведення реверсивної інженерії

Перше що треба зробити з даною деталлю, це відсканувати її форму на 3D сканері. В якості сканера будемо застосовувати David laserscanner SLS-1 (рис. 2.2).

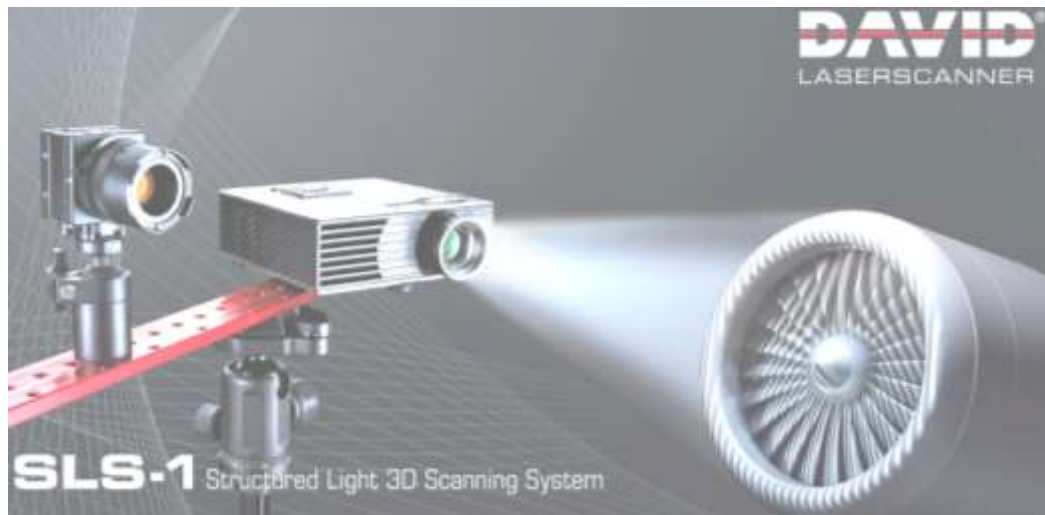


Рисунок 2.2 – David laserscanner SLS-1

Технічні характеристики:

- розмір об'єкта сканування ~ 10 мм – 600 мм;
- камера DAVID-CAM-3-M 1280 x 960 з (подвійною роздільною здатністю);
- об'єктив мегапіксельної камери від Computar;
- роздільна здатність: ~0.1% розміру об'єкта (до 0.04 мм);
- точність: ~0.1% розміру об'єкта (до 0.1 мм);
- час сканування: 2-4 секунди на сканування;
- щільність сітки: до 350,000 XNUMX вершин за кольорову текстуру сканування;
- формати експорту: obj, stl, ply.

Перед початком сканування необхідно провести калібровку 3D сканера. Вона на пряму залежить від висоти об'єкту сканування. Необхідно скористатися методикою зображеною на рисунку 2.3.

Вхідні дані:

Розмір об'єкта сканування/область поверхні s (висота) --- 70 мм

Паттерн (рисунок 2.4) калібрування --- 60 мм

Відстань до лінзи b між камерою і проектором --- приблизно 65 мм

Відстань d між сканером і об'єктом --- приблизно 180 мм

Роздільна здатність сканування (приблизно 0,2% від розміру об'єкта) --- приблизно 0,15 мм

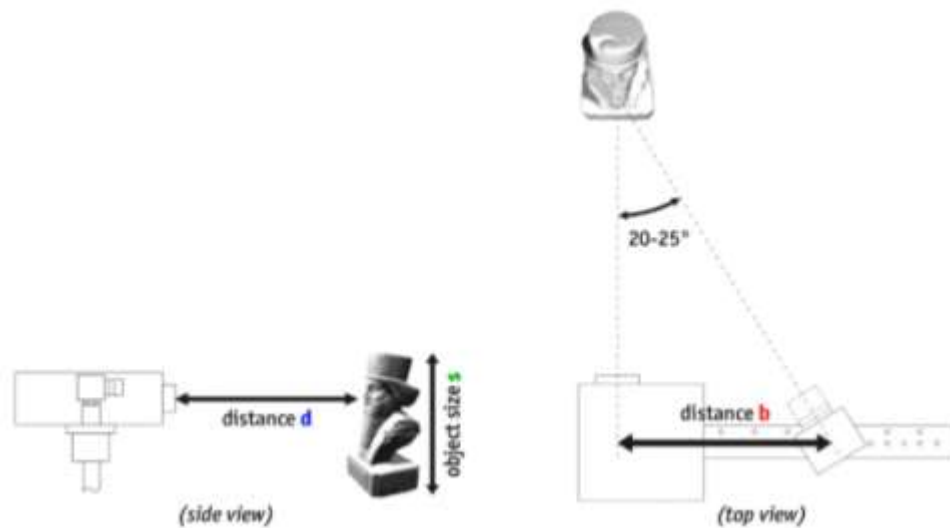


Рисунок 2.3 – Процес налагодження перед початком сканування об'єкту.

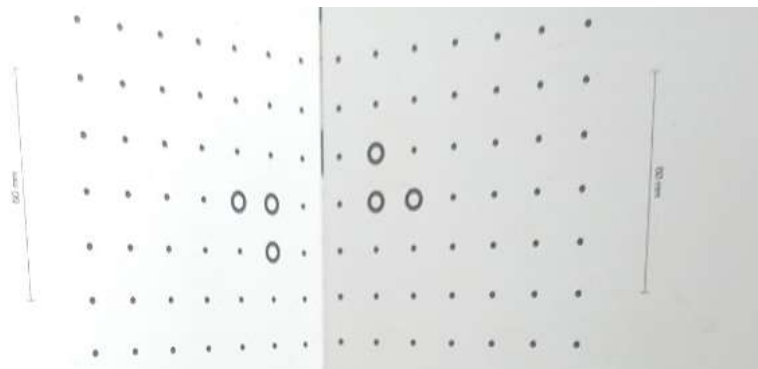


Рисунок 2.4 – Паттерн калібрування.

Здійснивши усі необхідні підготовчі роботи можна переходити до процесу 3D сканування дослідного об'єкту (рис. 2.5).



Рисунок 2.5 – Процес сканування.

2.2 Опрацювання відсканованого матеріалу

Скористаємося програмним забезпеченням HP 3D SCAN. Сам процес сканування деталі полягає у проектуванні серії патернів на об'єкт через проектор (рис. 2.6) відповідно камера фіксує відхилення зображення від «норми» і спеціальними алгоритмами відхилення перетворюються в хмару точок з якої буде формуватися 3D поверхня об'єкту (рис. 2.7).

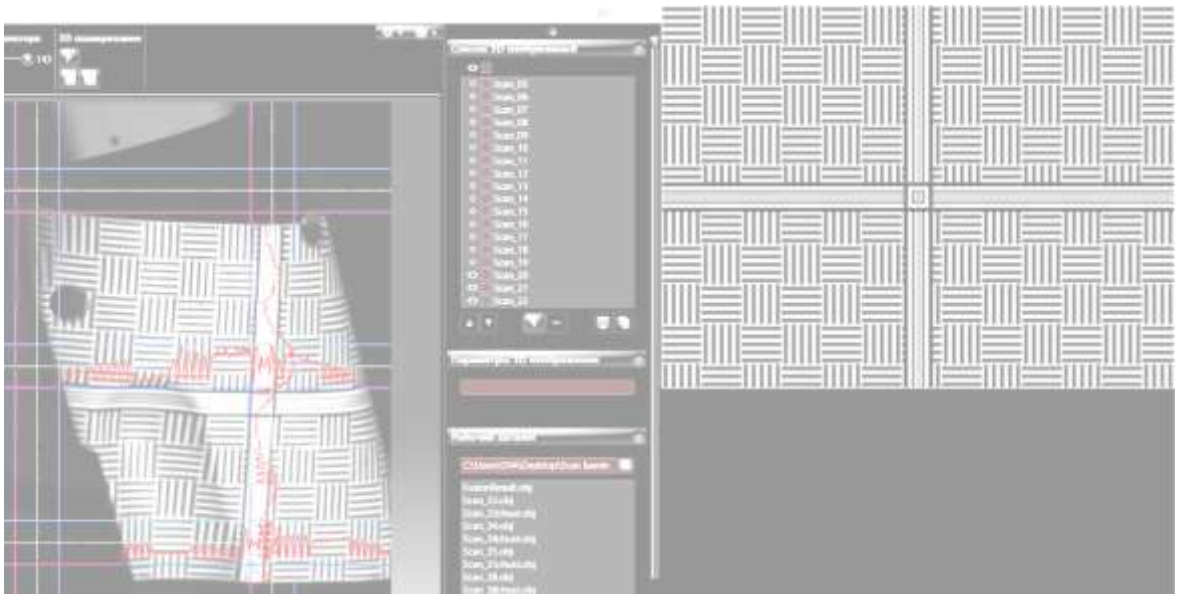


Рисунок 2.6 – Проектовані патерни на об'єкт.

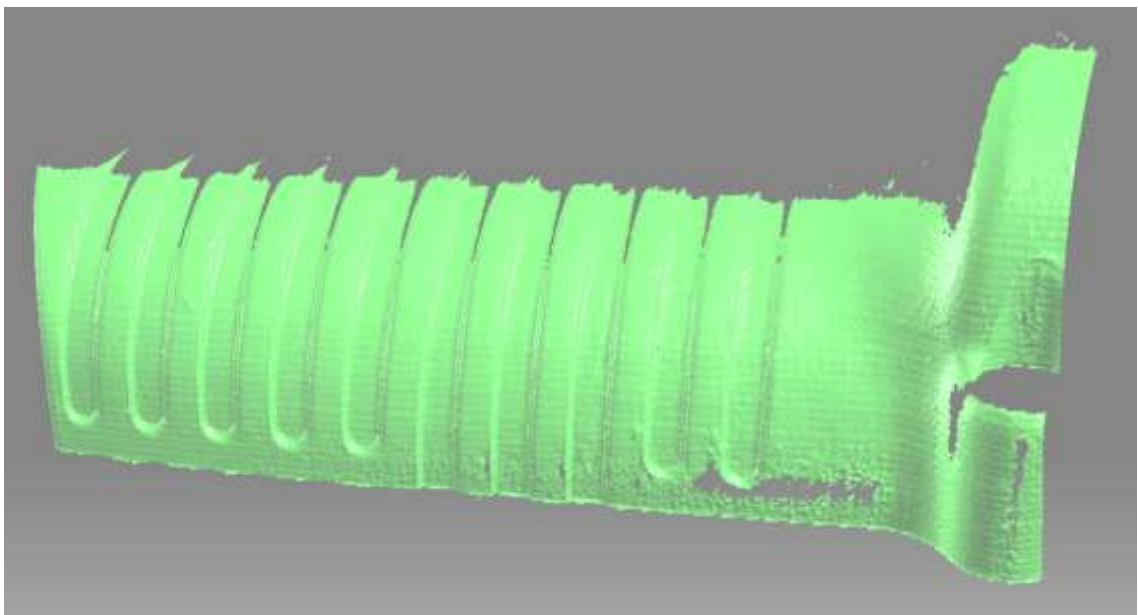


Рисунок 2.7 – Сформована 3D поверхня об'єкту.

Оскільки деталь об'ємна, відповідно її треба відстановувати зі всіх сторін, також і зверху. До прикладу на рисунку 2.8 представлено ще одна 3D поверхня об'єкту, але іншої частини. Загалом було проскановано 18 частин об'єкта відповідно отримано їх 3D поверхні.

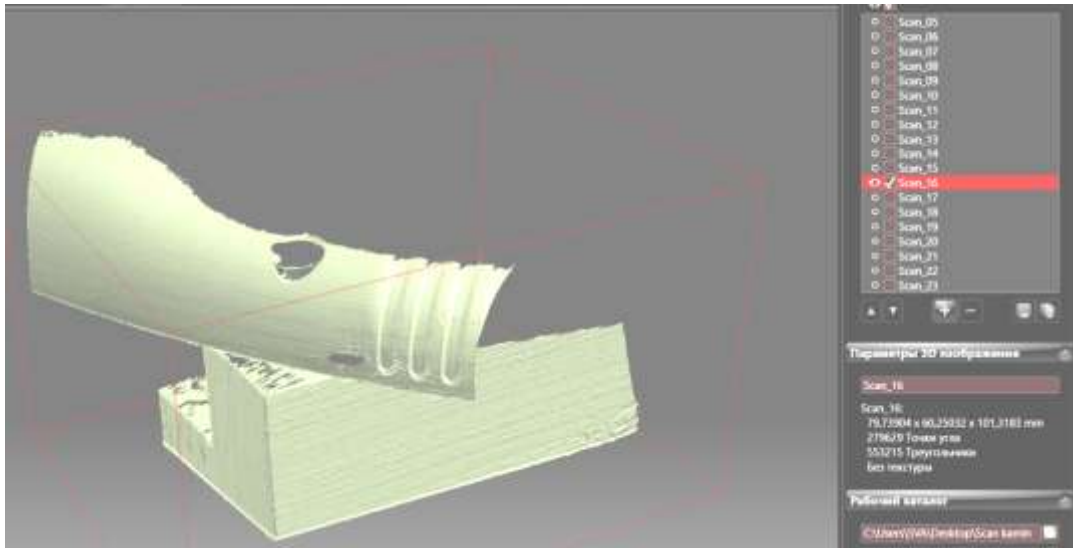


Рисунок 2.8 – Сформована 3D поверхня іншої частини об'єкту.

Наступний етап це «склейка» усіх просканованих частин в більшу. Сутність даної роботи полягає в виборі спільної ділянки на зображенні однієї поверхні і такої ж ділянки на іншому зображенні. Тоді 3D зображення будуть суміщатися так щоб максимальна кількість точок двох 3D поверхонь співпали (рис. 2.9).

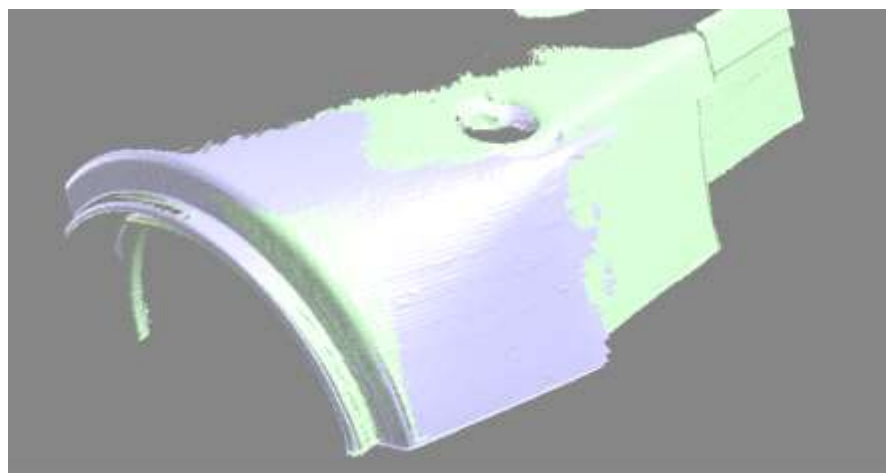


Рисунок 2.9 – «Склейка» 3D поверхонь об'єкту.

Відповідно провівши такі ж дії над усіма поверхнями можна отримати остаточну «склейку» (рис. 2.10).

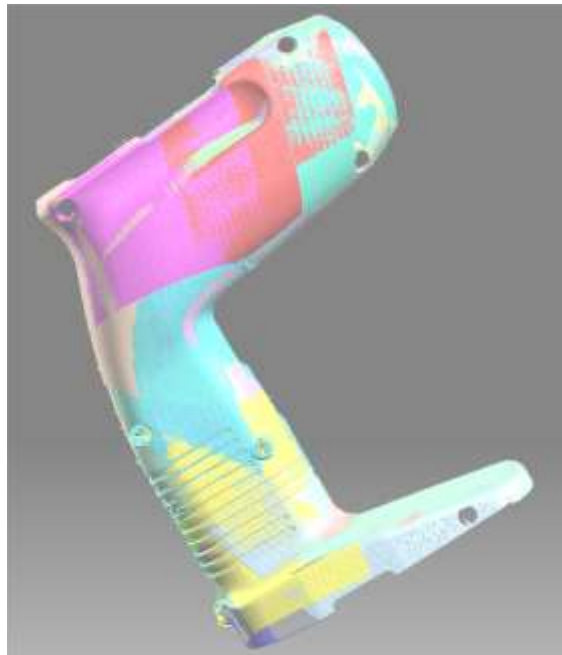


Рисунок 2.10 – «Склейка» 3D поверхонь об'єкту.

Зберігаємо отриману «склейку» в формат STL. Варто відмітити, що отримана 3D модель є ще доволі «сирою», тому з нею необхідно попрацювати ще в іншому ПЗ. До прикладу можна застосувати POWERSHAPE. В результаті отримаємо підправлену 3D модель (рис. 2.11).

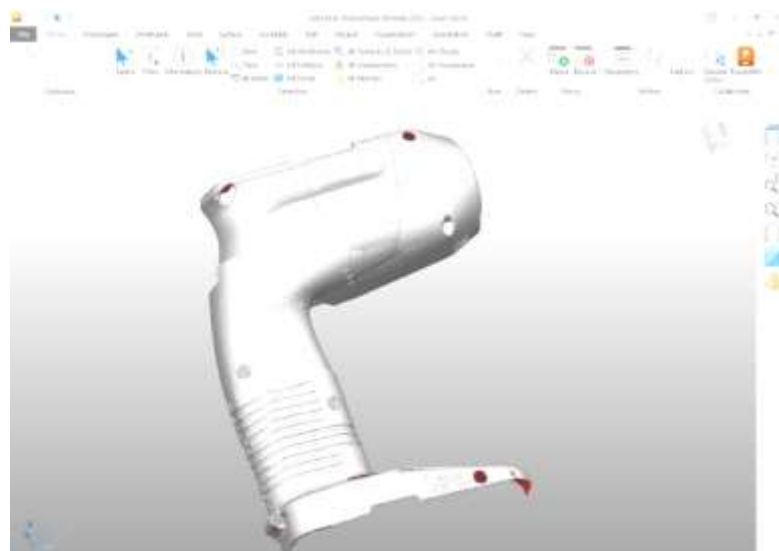


Рисунок 2.11 – Підправлена 3D модель в POWERSHAPE.

Сутність підправлень полягала у видаленні непотрібних частин (цифрового сміття) моделі, повороту строго по осях X Y Z. Такі дії необхідно провести оскільки даний об'єкт буде виготовлений двома способами, а саме:

- на 3D принтері;
- на фрезерному верстаті з ЧПК.

2.3 Висновки щодо розділу

В результаті після сканування об'єкту з усіх сторін, «склейки» отриманих сканів, чистки фінальної 3D моделі та її чіткого розташування згідно осей X Y Z отримали необхідний файл за яким буде здійснюватися подальші дії над безпосереднім виготовленням копії половини корпусу шурупверта.

3 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

3.1. Налагодження обробки деталі складної форми для 3D друку

Перед початком виготовлення деталі за допомогою 3D друку необхідно здійснити попередні налагодження. Застосуємо програмне забезпечення Creality Slicer. Отже у вікно даного ПЗ завантажуюмо файл з 3D моделлю половини корпусу шурупверта (рис. 3.1). Варто зауважити, що будемо друкувати виріб на 50% меншим за оригінал (з міркувань економії пластику), оскільки мета роботи відтворити саме складну геометричну форми застосовуючи реверсивну інженерію, а не виготовлення абсолютно точної копії дослідної деталі.

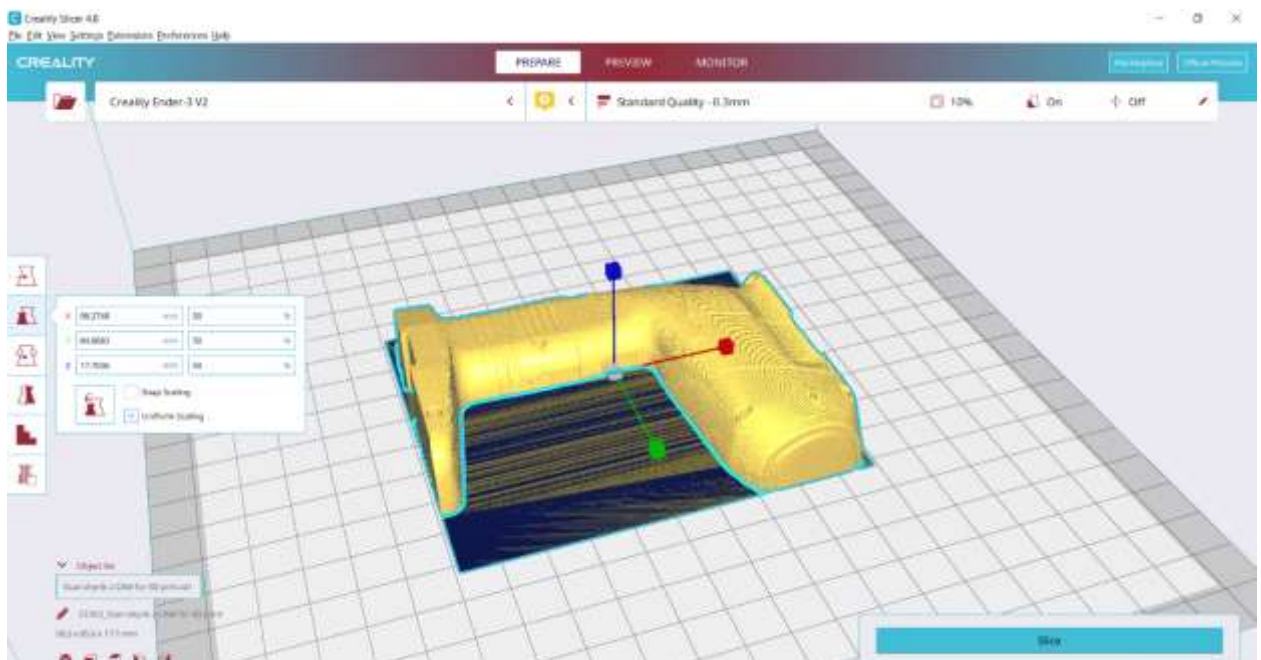


Рисунок 3.1 – 3D модель половини корпусу шурупверта в ПЗ Creality Slicer

Здійснимо необхідні налагодження для друку (рис. 3.2). Варто відмітити самі базові:

- Тип пластику – PETG;
- Товщина шару – 0,3 мм;
- Щільність заповнення об'єму – 10%.

Усі інші налагодження нехай залишаться такими які рекомендує ПЗ Creality Slicer для 3D принтера Creality Ender-3 V2.



Рисунок 3.2 – Налаштування 3D друку

В обов'язковому режимі варто переглянути симуляцію (рис. 3.3) виготовлення деталі з метою переконання, що усе буде проходити так як планувалося.

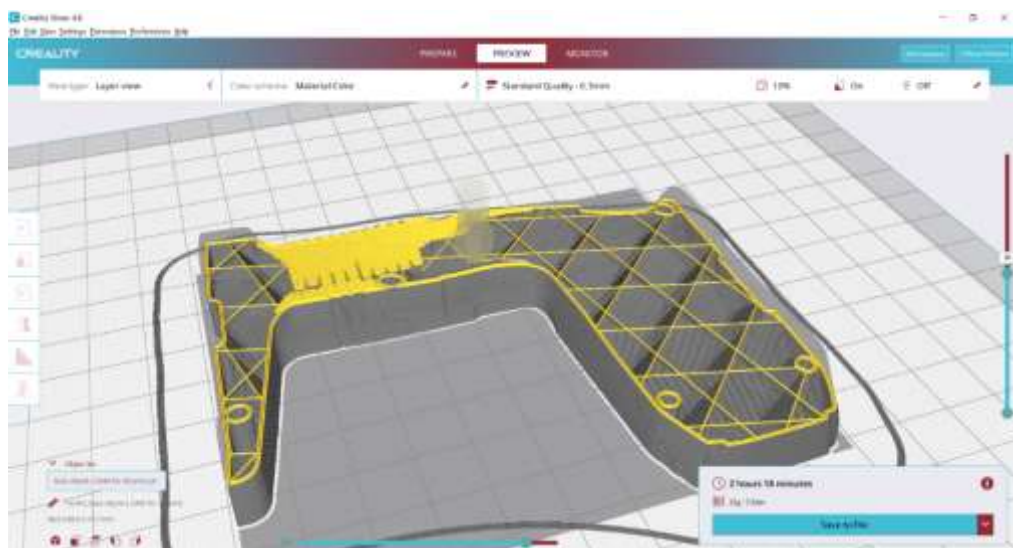


Рисунок 3.3 – Перегляд симуляції 3D друку

В разі успішної симуляції можна тоді генерувати G-код згідно якого 3D принтер виконає роботу. Фрагмент G-коду представимо нижче:

```
M140 S60
```

```
M105
```

```
M190 S60
```

```
M104 S200
```

```
M105
```

```
M109 S200
```

```
M82 ;absolute extrusion mode
```

```
G28 ;Home
```

```
G92 E0 ;Reset Extruder
```

```
G1 Z2.0 F3000 ;Move Z Axis up
```

```
G1 X10.1 Y20 Z0.28 F5000.0 ;Move to start position
```

```
G1 X10.1 Y200.0 Z0.28 F1500.0 E15 ;Draw the first line
```

```
G1 X10.4 Y200.0 Z0.28 F5000.0 ;Move to side a little
```

```
G1 X10.4 Y20 Z0.28 F1500.0 E30 ;Draw the second line
```

```
G92 E0 ;Reset Extruder
```

```
G1 Z2.0 F3000 ;Move Z Axis up
```

```
G92 E0
```

```
G92 E0
```

```
G1 F1500 E-4
```

```
;LAYER_COUNT:59
```

```
;LAYER:0
```

```
M107
```

```
G0 F6000 X54.396 Y76.586 Z0.2
```

```
;TYPE:SKIRT
```

G1 F1500 E0
G1 F1200 X55.168 Y76.054 E0.03118
G1 X55.983 Y75.591 E0.06236
G1 X56.893 Y75.175 E0.09564
G1 X57.168 Y75.064 E0.1055
G1 X58.052 Y74.75 E0.1367
G1 X58.959 Y74.513 E0.16788
G1 X60.079 Y74.33 E0.20563
G1 X60.215 Y74.315 E0.21018
G1 X60.844 Y74.264 E0.23117
G1 X61.415 Y74.234 E0.25019
G1 X61.65 Y74.224 E0.25801
G1 X62.228 Y74.206 E0.27724
G1 X62.588 Y74.201 E0.28922
G1 X63.197 Y74.202 E0.30947
G1 X64.126 Y74.243 E0.3404
G1 X64.589 Y74.284 E0.35586
G1 X66.707 Y74.499 E0.42667
G1 X69.213 Y74.681 E0.51024
G1 X71.713 Y74.792 E0.59347
G1 X74.263 Y74.833 E0.6783
G1 X76.751 Y74.802 E0.76105
G1 X79.282 Y74.699 E0.8453
G1 X81.798 Y74.526 E0.92918
G1 X84.299 Y74.283 E1.01276
G1 X86.785 Y73.969 E1.0961
G1 X89.271 Y73.584 E1.17977

....

Отже для того щоб 3D принтер запусився варто в його пам'ять завантажити вище представлений G-код.

3.2. Налаштування обробки деталі складної форми для фрезерування на фрезерному верстаті з ЧПК

Для здійснення налаштування фрезерування дослідної деталі, а саме половина корпусу шуруповерта можна скористатися програмним забезпеченням FeatureCAM. Отже в вікно програми завантажуюмо раніше підготовлений файл (але попередньо за одиниці вимірювання і виду обробки вибираємо фрезерування і міліметри відповідно, це зображено на рисунку 3.4) в якому є «склеєна» та підправлена 3D модель дослідної деталі (рис. 3.5).



Рисунок 3.4 – Вибір виду обробки та одиниць вимірювання

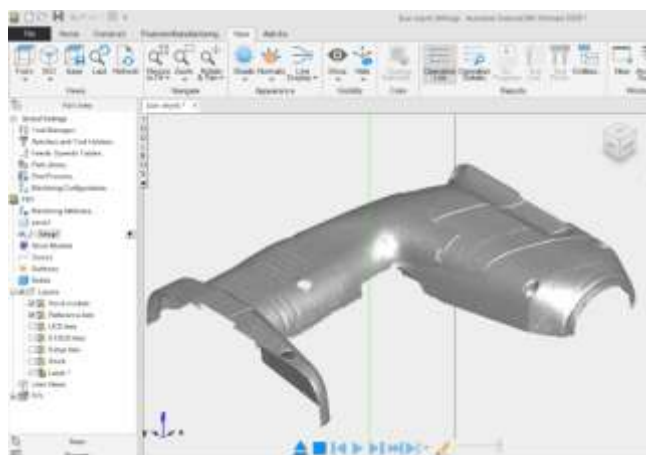


Рисунок 3.5 – Імпортована 3D модель дослідної деталі

Далі необхідно розташувати модель деталі згідно осей Z (рис. 3.6) X та Y (рис. 3.7).

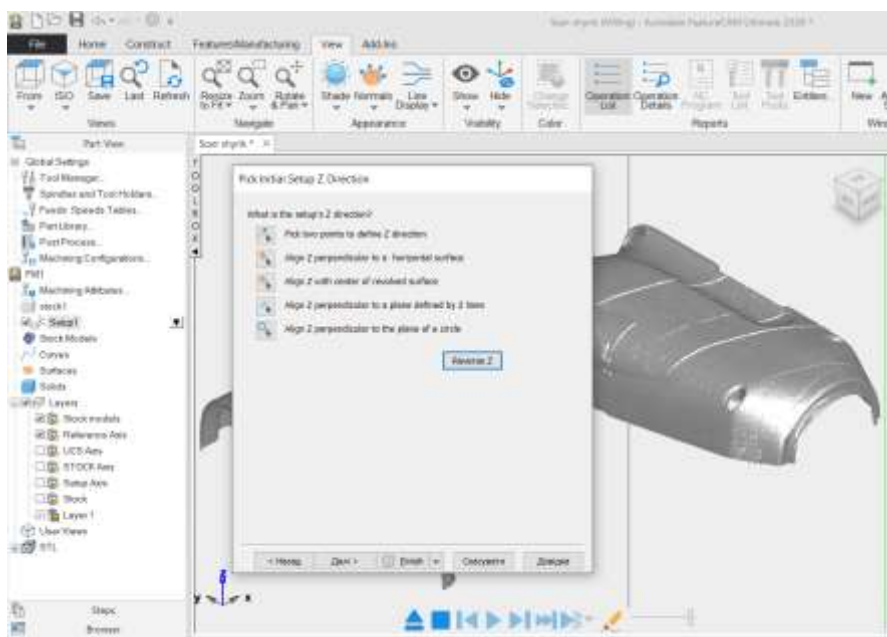


Рисунок 3.6 – Розташування деталі згідно осі Z

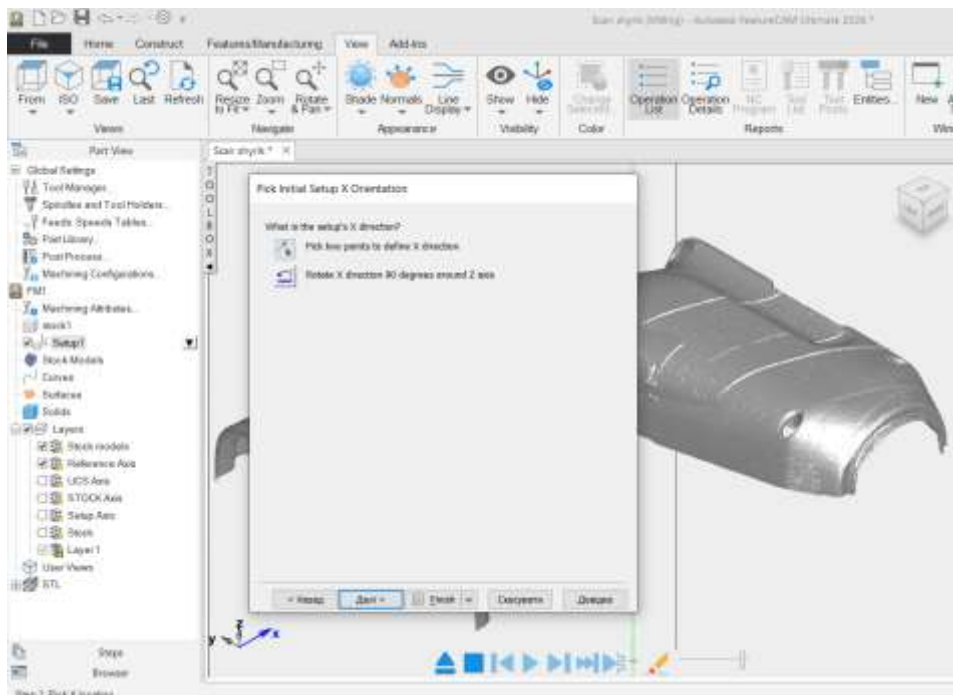


Рисунок 3.7 – Розташування деталі згідно осі X

Продовжуючи налагодження необхідно вибрати форму та розмір заготовки. Отже в якості форми виберемо паралелепіпед, а розмір буде таким, як габаритний розмір самої деталі (рис. 3.8).

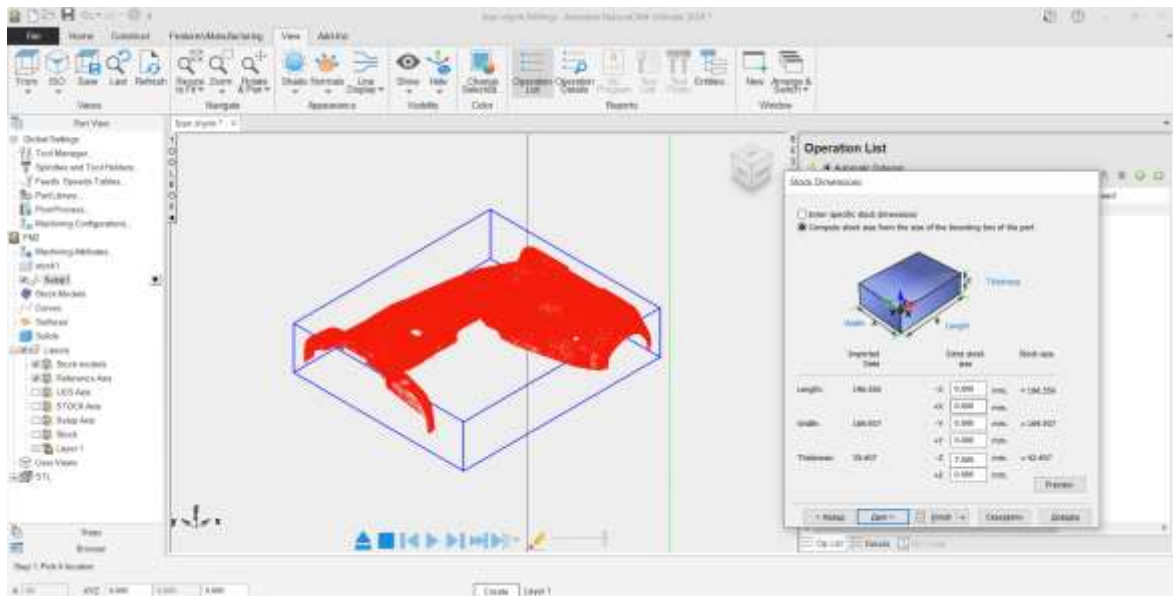


Рисунок 3.8 – Вибір форми та розміру заготовки

Далі необхідно вибрати «нуль фрези» або ж початкову систему координат. Нехай оберемо що вона буде на поверхні деталі всередині (рис. 3.9).

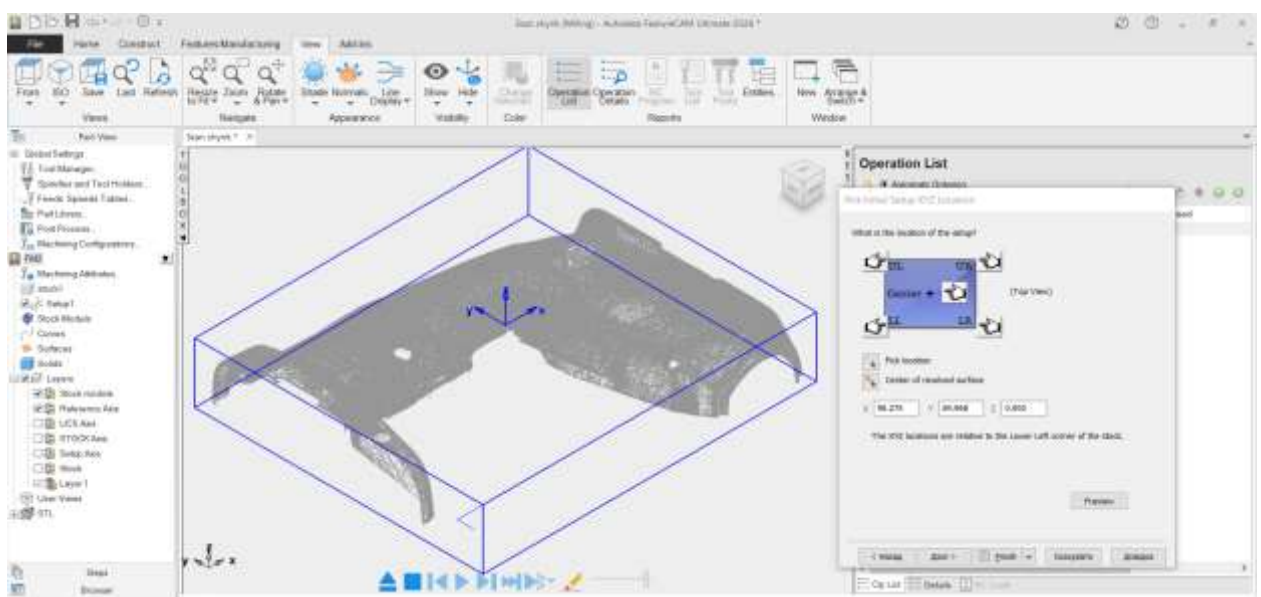


Рисунок 3.9 – Визначення початкової системи координат

Далі застосовуючи опцію «Елементи» вибрати саму поверхню імпортованої 3D моделі і обрати режим фрезерування як криволінійна поверхня (рис. 3.10) нестандартизованої форми та розміру.

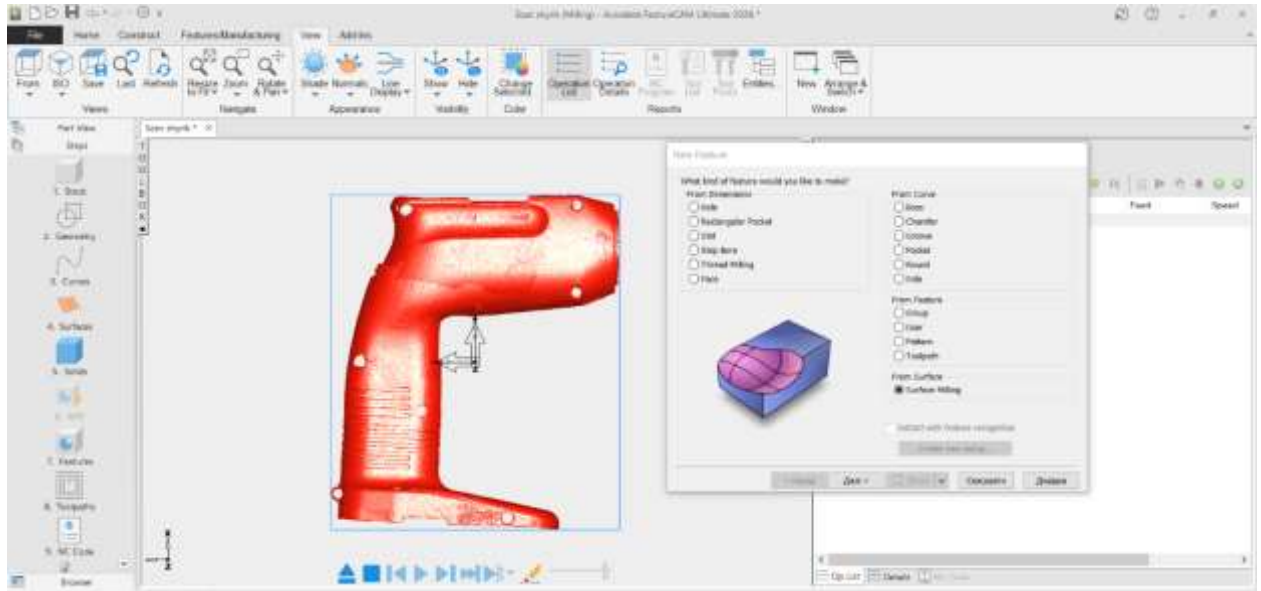


Рисунок 3.10 – Обрання режиму фрезерування як криволінійна поверхня

Далі оберемо обробку чорнову та чистову. Чорнова фрезою діаметром 8мм, а чистову – фрезою діаметром 1 мм. В результаті можна побачити список операцій з інструментами та режимами різання (рис. 3.11) які необхідні для виготовлення деталі на фрезерному верстаті з ЧПК.

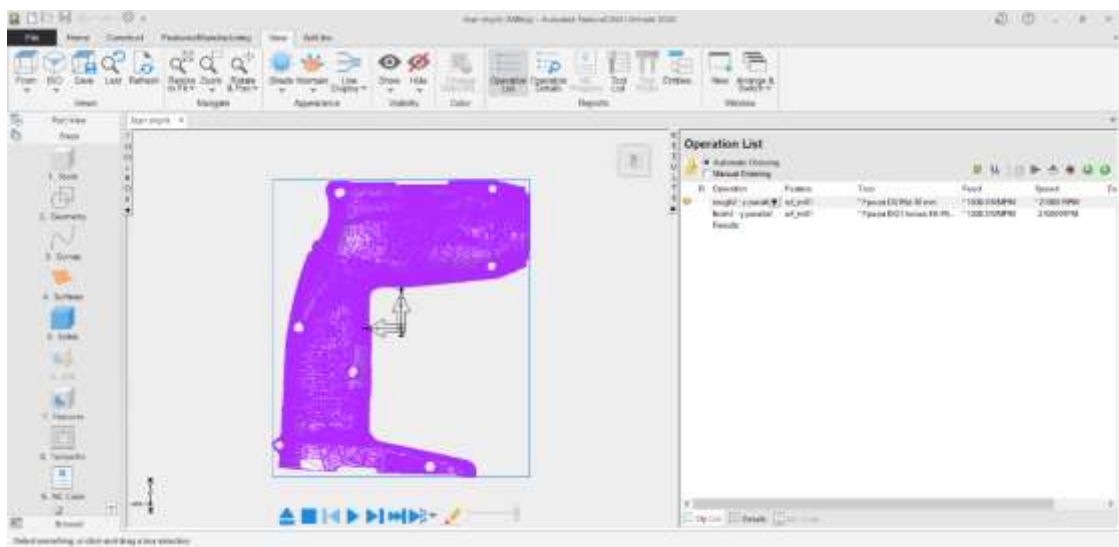


Рисунок 3.11 – Налаштування операцій та відповідно їм режимів різання

Далі здійснивши усі налагодження можна переглянути симуляцію обробки. Наведемо симуляцію чорнової (рис. 3.12) та чистової (рис. 3.13) обробок.

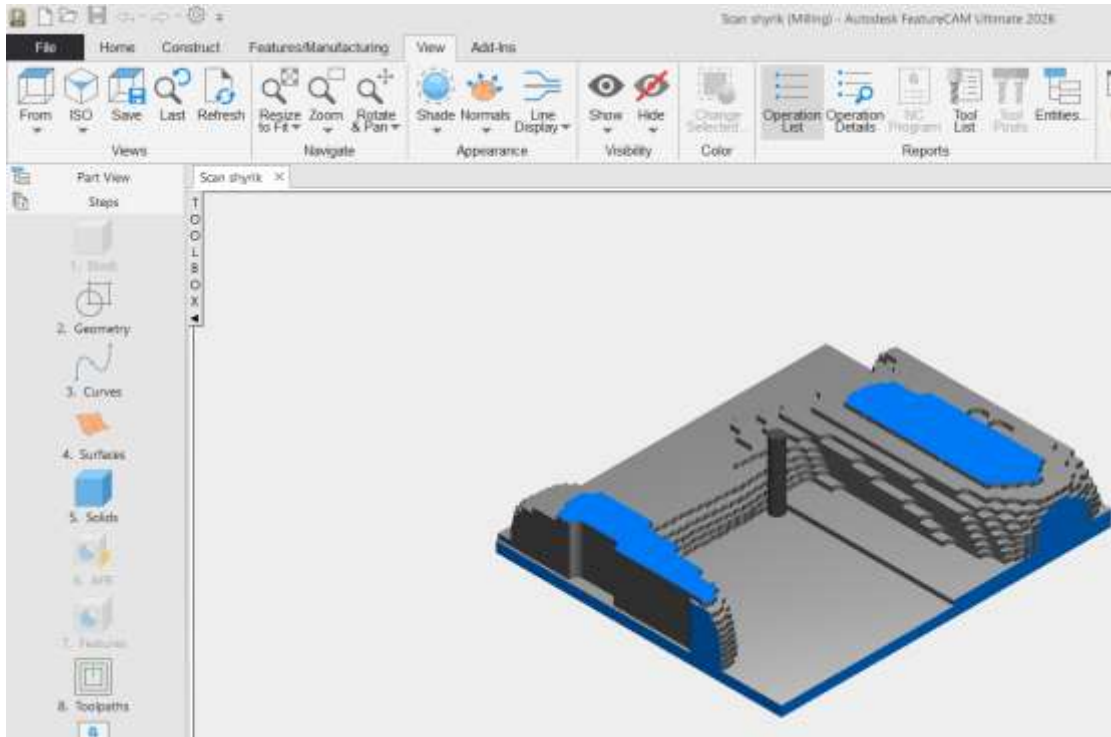


Рисунок 3.12 – Симуляція чорнової обробки

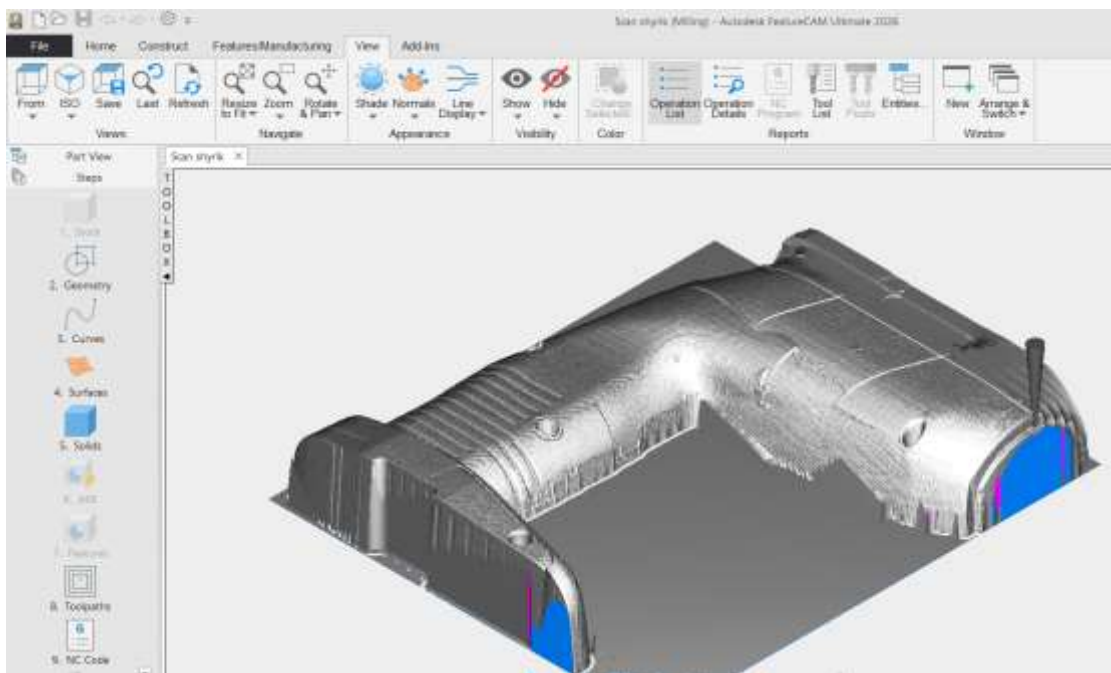


Рисунок 3.13 – Симуляція чистової обробки

Відповідно якщо результат симуляції влаштовує, то можна генерувати G-код згідно якого фрезерний верстат з ЧПК виконає необхідну роботу.

Нижче приведемо фрагмент G-коду.

N35 G00 G92 X0 Y0 Z0

N40 (ROUGH2 Y PARALLEL/-90 SRF_MILL1)

N45 M6 T1

N50 G94

N55 X-100.8 Y88.1 S21000 M03

N60 Z3.0

N65 G01 Z-2.701 F500.

N70 Y-27.762 F1000.

N75 Y-28.145 Z-2.657

N80 Y-28.566 Z-2.651

N85 G00 Z5.0

N90 X-96.0 Y20.274

N95 Z3.0

N100 G01 Z-2.651 F500.

N105 Y20.275 Z-2.701 F1000.

N110 Y38.893

N115 Z-2.651

N120 G00 Z5.0

N125 X-100.8 Y-30.842

N130 Z3.0

N135 G01 Z-2.651 F500.

N140 Y-31.2 Z-2.701 F1000.

N145 Y-34.352

N150 Z-2.651

N155 G00 Z5.0

N160 X-96.0 Y54.599

N165 Z3.0
N170 G01 Z-2.651 F500.
N175 Y54.839 Z-2.7 F1000.
N180 Y54.842 Z-2.701
N185 Y88.969
N190 G00 Z5.0
N195 X-91.2
N200 Z3.0
N205 G01 Z-2.701 F500.
N210 Y56.049 F1000.
N215 Y56.047 Z-2.7
N220 Y55.831 Z-2.651
N225 G00 Z5.0
N230 X-86.4 Y58.367
N235 Z3.0
N240 G01 Z-2.651 F500.
N245 Y58.641 Z-2.7 F1000.
N250 Y58.648 Z-2.701
N255 Y88.969
N260 G00 Z5.0
N265 X-81.6
N270 Z3.0
N275 G01 Z-2.701 F500.
N280 Y58.367 F1000.
N285 Y58.365 Z-2.7
N290 Y58.116 Z-2.651
N295 G00 Z5.0
N300 X-76.8 Y58.13
N305 Z3.0
N310 G01 Z-2.651 F500.

N315 Y58.383 Z-2.7 F1000.
N320 Y58.384 Z-2.701
N325 Y88.969
N330 G00 Z5.0
N335 X-72.0
N340 Z3.0
N345 G01 Z-2.701 F500.
N350 Y53.997 F1000.
N355 Y53.732 Z-2.651
N360 G00 Z5.0
N365 X-100.8 Y-88.1
N370 Z3.0
N375 G01 Z-2.701 F500.
N380 Y-41.292 F1000.
N385 Y-41.282 Z-2.697
N390 Y-41.192 Z-2.651
N395 G00 Z5.0
N400 X-96.0 Y-43.193
N405 Z3.0
N410 G01 Z-2.651 F500.
N415 Y-43.303 Z-2.699 F1000.
N420 Y-43.307 Z-2.701
N425 Y-88.968
N430 G00 Z5.0
N435 X-91.2
N440 Z3.0
N445 G01 Z-2.701 F500.
N450 Y-43.007 F1000.
N455 Y-42.997 Z-2.7
N460 Y-42.896 Z-2.651

N465 G00 Z5.0
N470 X-86.4 Y-38.992
N475 Z3.0
N480 G01 Z-2.651 F500.
N485 Y-39.12 Z-2.698 F1000.
N490 Y-39.126 Z-2.701
N495 Y-88.968
N500 G00 Z5.0
N505 X-81.6
N510 Z3.0
N515 G01 Z-2.701 F500.
N520 Y-24.926 F1000.
N525 Y-24.757 Z-2.651
N530 G00 Z5.0
N535 X-76.8 Y-6.252
N540 Z3.0
N545 G01 Z-2.651 F500.
N550 Y-6.348 Z-2.7 F1000.
N555 Y-6.351 Z-2.701
N560 Y-88.968
N565 G00 Z5.0
N570 X-72.0
N575 Z3.0
N580 G01 Z-2.701 F500.
N585 Y14.345 F1000.
N590 Y14.349 Z-2.698
N595 Y14.419 Z-2.651
N600 G00 Z5.0
N605 X-67.2 Y88.969
N610 Z3.0

N615 G01 Z-2.701 F500.

...

Отже для того щоб фрезерний верстат з ЧПК запусився варто в його пам'ять завантажити вище представлений G-код.

3.3. Висновки щодо розділу

В даному розділі було здійснено підготовку до реального виготовлення деталі типу половина корпусу шурупверта на фрезерному верстаті з ЧПК та 3D принтері. Для реалізації необхідних операцій на вище переліченому обладнанні було згенеровано G-коди в програмному забезпеченні Creality Slicer та FeatureCAM.

4 ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

4.1. Виготовлення дослідної деталі на 3D принтері

Здійснивши підготовку для виготовлення деталі на 3D принтері, можна її розпочинати.

Отже принтер на якому буде друкуватися деталь являє собою Creality Ender-3 V2 [2] (рис. 4.1).

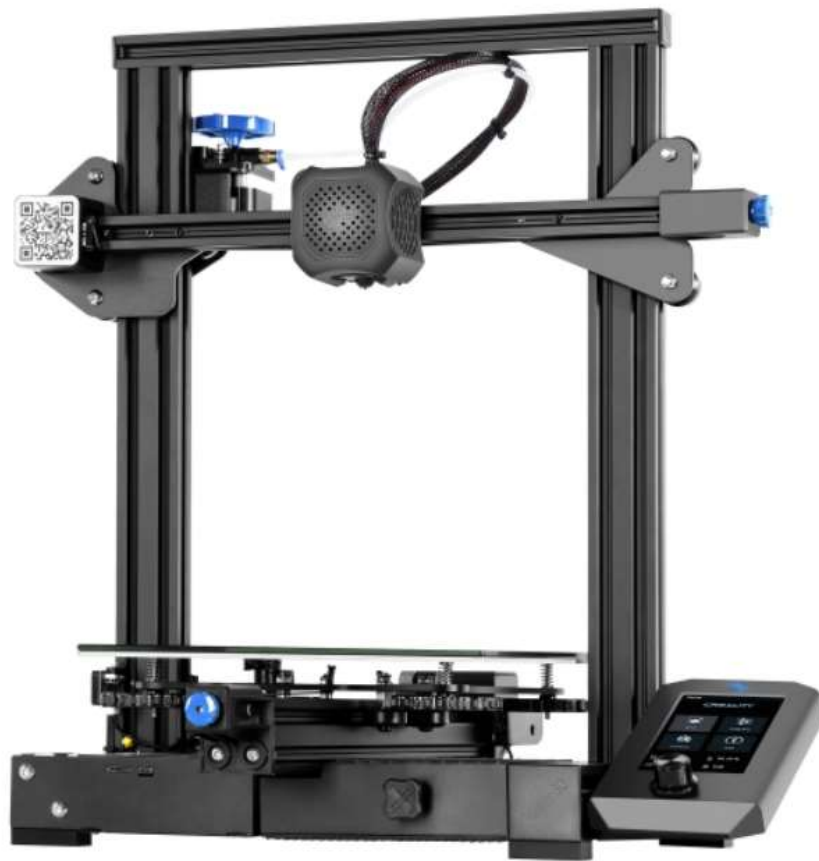


Рисунок 4.1 – 3D принтер Creality Ender-3 V2

Основні технічні характеристики

Виробник	Creality 3D
Технологія друку	FDM/FFF
ABS	
ABS+	
ASA	

HIPS

PET

PETG

PLA

SILK

TPU

Температура платформи, °C 110

Діаметр пластику, мм 1.75

Вага, кг 7.8

Країна Китай

Гарантія 12 місяців

Висота шару, мм 0.1-0.4

Температура сопла, °C 255

Швидкість друку, мм / с до 180

Платформа 3 підігрівом

Область друку, мм 220x220x250

Діаметр сопла, мм 0.4

Габарити (ШxГxВ), мм 440x410x465

Особливості Відновлення друку

З підігрівом столу

Недорогі

Кількість екструдерів 1

для автозапчастин

для архітектури

для виробництва

для дизайну

для дому

для дітей

для макетування

для малого бізнесу



Рисунок 4.3 – Надрукована тестова деталь

Також можна відмітити, що витрата пластику склала 22 грами або ж в іншій величині 7,52 метри дроту пластику.

4.2. Виготовлення дослідної деталі на фрезерному верстаті з ЧПК

Попередньо сформований G-код завантажується в програмне забезпечення Mach3 (рис. 4.4).

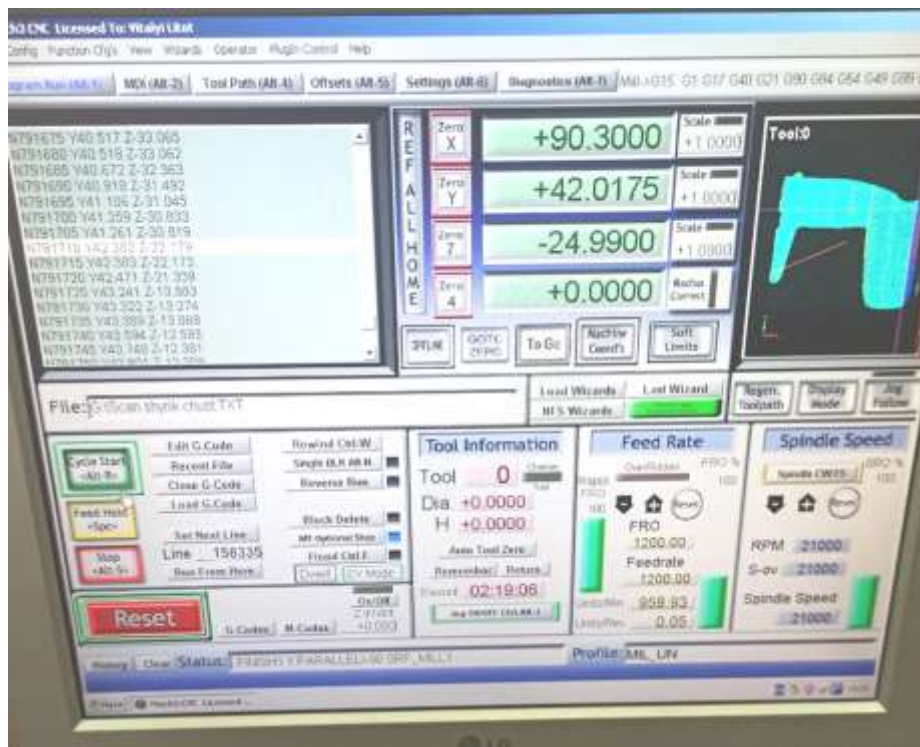


Рисунок 4.4 – ПЗ Mach3, що керує фрезерним верстатом з ЧПК

Вище представлене ПЗ безпосередньо надсилає програмний код на фрезерний верстат з ЧПК який його виконує.

Далі необхідно закріпити на столі верстата заготовку (рис. 4.5).

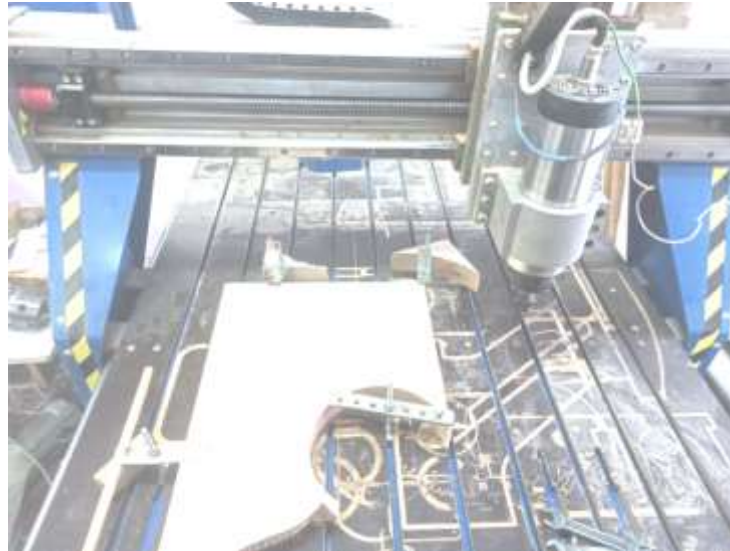


Рисунок 4.5 – Закріплення заготовки

Для обробки варто використати 2 фрези. Перша фреза для чорнової обробки – циліндрична з плоским кінцем та діаметром 8мм, друга фреза для чистової обробки – конічна з скругленим кінцем та діаметром 1мм. На рисунку 4.6 наведено результат чорнового оброблення.



Рисунок 4.6 – Результат чорнового оброблення

На рисунку 4.7 наведено фрагмент виконання чистового оброблення.



Рисунок 4.7 – Фрагмент роботи чистового оброблення

В результаті отримали готову деталь складної форми (рис. 4.8) виготовленої на верстаті з ЧПК



Рисунок 4.9 – Готова деталь

Загальний час обробки 4 години оскільки деталь має складну фасонну поверхню.

4.3. Висновки щодо розділу

Даний розділ повністю був присвячений виготовленню тестових деталей за допомогою адитивних технологій і на фрезерному верстаті з ЧПК. В результаті було представлено повний цикл реверсивної інженерії.

ВИСНОВКИ

В першому розділі були розглянуті наступні питання: поняття реверсивної інженерії, про реверсивну інженерію апаратного забезпечення, огляд процесу реверсивної інженерії, про 3D-сканери для реверсивної інженерії, використовуване програмне забезпечення для реверсивної інженерії, про 3D-принтери для реверсивної інженерії.

В другому розділі здійснено 3D сканування обраної деталі складної форми та опрацьовано відсканований матеріал.

В третьому розділі описано налагодження обробки деталі складної форми для 3D друку, а також налагодження обробки деталі складної форми для фрезерування на фрезерному верстаті з ЧПК.

В четвертому розділі проведена робота над виготовленням дослідної деталі на 3D принтері та на фрезерному верстаті з ЧПК.

Загалом представлена робота продемонструвала усі етапи реверсивної інженерії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Матеріали за посиланням <https://formlabs.com/blog/reverse-engineering/>
2. Матеріали за посиланням <https://3d4u.com.ua/uk/ender-3-v2-3d-printer-creality/p401?srsltid=AfmBOoo85qcaa0-alpw0klSWizjQeG6lkvfXyJuupEPHK6F0Ep9dudo5>
3. Ways of abrasive blasting technology development V A Sychuk and O V Zabolotnyi Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1060, Advanced Materials & Demanding Applications 2020 (AMDA 2020) 22nd-26th June 2020 Citation V A Sychuk and O V Zabolotnyi 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1060 012005 DOI 10.1088/1757-899X/1060/1/012005
4. Solidworks у завданнях 3D моделювання та інжинірингу технічних систем. Навч. посібник / В.Я. Ворощук, Т.М. Вітенько. Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2021. 164 с.
5. Божко Т. Є. Впровадження засобів САПР у навчальному процесі в Луцькому національному технічному університеті / Т. Є. Божко, Т. Н. Гальчук, В. А. Сичук // Наукові нотатки. - 2016. - Вип. 54. - С. 49-52. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2016_54_10.
6. Reverse engineering // Wikipedia : вільна енциклопедія [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Reverse_engineering.
7. Інноваційне обладнання автоматизованого виробництва. Конструктивні особливості та основи програмування верстатів з числовим програмним керуванням [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» спеціалізації «Технології комп'ютерного конструювання верстатів, роботів та машин» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Ковальов В.А., Гаврушкевич А.Ю., Гаврушкевич Н.В. – Електронні текстові дані (1 файл: 21,8 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 158с.
8. Довідкові матеріали програмного забезпечення FeatureCAM.

9. Довідкові матеріали програмного забезпечення HP 3D Scan.
10. Довідкові матеріали програмного забезпечення Creality Slicer.
11. Довідкові матеріали програмного забезпечення Mach3.
12. Довідкові матеріали 3D сканера David laserscanner SLS-1.
13. Довідкові матеріали 3D принтера Creality Ender-3 V2.
14. Довідкові матеріали програмного забезпечення PowerSHAPE.