

Д.А. Гусачук, М.Д. Мельничук, І.О. Парфентьєва, Т.В. Фурс, І.В. Боярська, М.М. Карпюк

Луцький національний технічний університет

ПРОТОТИПУВАННЯ ТА СТРАТЕГІЯ РЕВЕРС ІНЖИНІРИНГУ НА ПРИКЛАДІ ІНЖЕНЕРНИХ ЗАДАЧ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА

В роботі розглядаються аспекти, які прямо чи опосередковано впливають на результати реверс інжинірингу в практиці прототипування виробів машинобудівного призначення. На основі аналізу типових схем і алгоритмів реверс інжинірингу з використанням технологій адитивного виробництва та оптимізації процесів 3D сканування, розроблені рекомендації щодо підготовки, виконання та постобробки цифрових сканів інженерних об'єктів для забезпечення якості та швидкості їх реконструкції, з використанням оптичних 3D сканерів зі структурованим світлом. Дослідження здійснено завдяки успішній реалізації міжнародного проєкту "Посилення ролі ЗВО в промисловій трансформації в контексті парадигми Industry 4.0 в Грузії та Україні" (<https://hein4.net>).

Ключові слова: адитивне виробництво, реінжиніринг, 3D друк, CAD модель, 3D сканер, FDM технології, прототип, STL модель, слайсинг

D. Husachuk, M. Melnychuk, I. Parfentieva, T. Furs, I. Boiarska, M. Karpyuk

PROTOTYPING AND REVERSE ENGINEERING STRATEGY USING THE EXAMPLE OF ADDITIVE MANUFACTURING ENGINEERING PROBLEMS

The aspects that directly or indirectly affect the results of reverse engineering in the practice of prototyping mechanical engineering products are examined in the work. Based on the analysis of typical reverse engineering schemes and algorithms using additive manufacturing technologies and optimization of 3D scanning processes, recommendations have been developed regarding the preparation, execution, and post-processing of digital scans of engineering objects to ensure the quality, accuracy, and speed of their reconstruction using optical 3D scanners with structured light. The research was carried out thanks to the successful implementation of the International Project "Boosting the role of HEIs in the industrial transformation towards the Industry 4.0 paradigm in Georgia and Ukraine" (<https://hein4.net>).

Keywords: additive manufacturing, reengineering, 3D printing, CAD model, 3D scanner, FDM technologies, prototype, STL model, slicing

Постановка проблеми. Сучасному інженеру добре відомо, якими трудомісткими є процеси створення предмету інженерної розробки, починаючи від обґрунтування ідеї, створення прототипу й виробництва першого промислового зразка та, з рештою, комерційного оригіналу продукції. В цьому ланцюжку, якраз етапи створення прототипів продукції, проведення їх ґрунтового аналізу, перевірки функціоналу й ергономіки, займають значний час всієї розробки.

До не давна роботи зі створення та виготовлення прототипів виконувались вручну кваліфікованими інженерами. Крім збільшення часу на виготовлення продукту, ручна робота часто обмежувала кількість можливих конструктивних змін. Це не дозволяло досягнути достатньої оптимізації продукту, його конструктивної досконалості і, особливо, функціональності. Тут, слід зазначити, що ця стратегія відтворення конструктивних елементів для деталей простої геометрії, активно використовується і зараз, коли за допомогою примітивів у спеціалізованому програмному середовищі будується параметрична 3D модель. Проте, в умовах значного зростання вимог до продуктивності та мобільності виробництва ручне прототипування переросло у серйозну проблему, рішення якої було знайдено за рахунок розробки та впровадження автоматизованих комп'ютерних технологій швидкого прототипування (RP – Rapid Prototyping). На етапах підготовки продукту до комерційного виробництва стали широко використовувати 3D системи та полігональні 3D моделі для створення фізичних предметів, прототипів, інструментального оснащення та функціональних деталей. Можливості цього напрямку, звісно, були сильно посилені швидким та глобальним прогресом в галузі цифрових та інформаційних технологій, процесорних систем, комп'ютерної інженерії, апаратних засобів комп'ютерних систем, також в галузі матеріалознавства, структурування сучасних матеріалів, та цифрового світу виробництва, загалом.

Функціональність матеріальних об'єктів залежить від двох їх характеристик: форми й складу матеріалу. Наприклад, хороший естетичний вигляд скульптури залежить від її форми, в той час, як, її міцність залежить від фізичних властивостей матеріалу. Відповідно, ідеальним виробничим процесом є такий, за допомогою якого можна згенерувати будь-яку геометричну форму з будь-якого

матеріалу. Однак традиційні виробничі процеси (консервативні чи субтрактивні) вкрай обмежені в цьому відношенні.

Адитивний підхід передбачає створення об'єкта на «порожньому місці» шляхом поступового додавання матеріалу. Матеріал, який додається кожен раз, може бути однаковим або різним. Таким чином, тут забезпечується можливість одночасного вирішення завдань формоутворення і контролю складу матеріалу в рамках одного процесу. Чим менше об'єм матеріалу, який додається на кожному етапі, тим більше досяжна точність форми та ступінь контролю складу матеріалу. Перевагою цього підходу, є те, що теоретично з його допомогою може бути отримана будь-яка тривимірна форма без використання зовнішніх інструментальних засобів із заданою формою. Це дозволяє повністю уникнути проблем, пов'язаних з консервативними і субтрактивними методами.

Методи пошарового синтезу на початку використовувались для створення демонстраційних моделей виробів в процесі їх розробки [1]. Загальновідомо, що ці моделі можуть бути набагато корисніші, ніж креслення або зображення для повного розуміння функцій виробу при концептуальному проектуванні. Незважаючи на наявність швидких і просто створюваних креслень, в кінцевому підсумку, більш бажаним є використання фізичних моделей, щоб досконало перевірити працездатність виробу.

Переслідуючи цю початкову мету простого створення моделей, адитивне виробництво (AM – Additive Manufacturing) прогресувало в напрямку поліпшення матеріалів, точності та загальної якості вихідного продукту [2]. Отримувані моделі швидко стали використовуватися для забезпечення інформації про те, що зараз називається «3F» (Form – форма; Fit – збирання; Function – функція). Відповідно, якщо зараз сказати, що технологія адитивного виробництва корисна лише для створення моделей, то це буде неточною і заниженою оцінкою. Сучасне адитивне виробництво в його поєднанні з іншими технологіями для формування технологічних ланцюжків може бути використано для значного скорочення термінів розробки та вартості продукції. В таких умовах постає проблема та ряд комплексних задач, пов'язаних з вирішенням питань швидкої адаптації методів реконструкції об'єктів до значної мінливості процесів AM в розрізі їх комерційних переваг. Інженеру слід швидко отримувати цифрові дані про об'єкт, що були би придатні для успішної реалізації відтворення об'єкту адитивними методами, та й ще ж до того – з можливістю простої та швидкої їх корекції. Звісно, мова тут іде про швидке отримання якісної параметричної моделі на основі цифрових сканів чи полігональних моделей, що навіть зараз, з появою спеціалізованих програмних продуктів, є не настільки простим завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використовуючи різноманітне програмне забезпечення та технологічні платформи, розширені обчислювальні потужності та можливості комунікацій, масштаби гнучкості сучасного адитивного виробництва різко зросли [1-3]. Крім того, значно зросла точність та надійність виробів, а висока ефективність проектування дає можливість впровадити індивідуальні технології виробництва продуктів із майже нескінченною гнучкістю дизайну.

Всі існуючі зразки комерційного обладнання для адитивного виробництва в даний час використовують пошаровий підхід, і головна їхня відмінність полягає в матеріалах, які вони можуть використовувати, в техніці створення шарів і способах зв'язування шарів між собою. Дані відмінності визначають такі чинники, як точність побудованої деталі, а також склад її матеріалу і механічні властивості. Крім того, вони визначають, як швидко може бути виготовлена деталь, розміри використовуваного AM обладнання та загальну вартість обладнання і процесу [4].

У випадку FDM друку, як найбільш доступної зараз технології пошарового просторового синтезу, номенклатура використовуваних полімерних матеріалів є найбільш широкою серед [5] інших способів адитивного виробництва. Це розширює можливості щодо оптимізації експлуатаційних характеристик виробів. З іншого боку, актуальними залишаються питання стратегії побудови CAD моделей [6], оптимізації її геометрії, підготовки та адаптації цифрових даних, вибору напрямку пошарового синтезу, оптимізації алгоритму побудови, для кожного конкретного виробу та задачі реінжинірингу, загалом [7].

За останні роки розроблено досить досконалий математичний апарат для обробки великих цифрових масивів CAD даних, на основі якого з'явилися багато комерційних програмних продуктів реінжинірингу [8]. Проте, для конкретних завдань прототипування важливим є вибір чи власна побудова стратегії процесу, що вимагає аналізу та співставлення переваг та недоліків відомих методів реконструкції моделей.

Постановка завдання та мета дослідження. Метою роботи є аналіз сучасних стратегій реверс інжинірингу з використанням технологій адитивного виробництва та оптимізація процесу прототипування, зокрема, на прикладах FDM друку конструктивних елементів та виробів.

Виклад основного матеріалу. Адитивне виробництво включає в себе кілька етапів (рис. 1), починаючи з віртуального САД опису деталі та її функціоналу, отримання цифрових даних процесу, та закінчуючи фізичним результатом її створення. Різноманітні вироби включають в себе процеси адитивного виробництва різними шляхами та в різній мірі. Відносно прості вироби можуть використовувати адитивне виробництво для демонстраційних моделей, в той час як, більші та складні вироби з великим інженерним наповненням можуть використовувати адитивне виробництво на багатьох етапах процесу розробки.

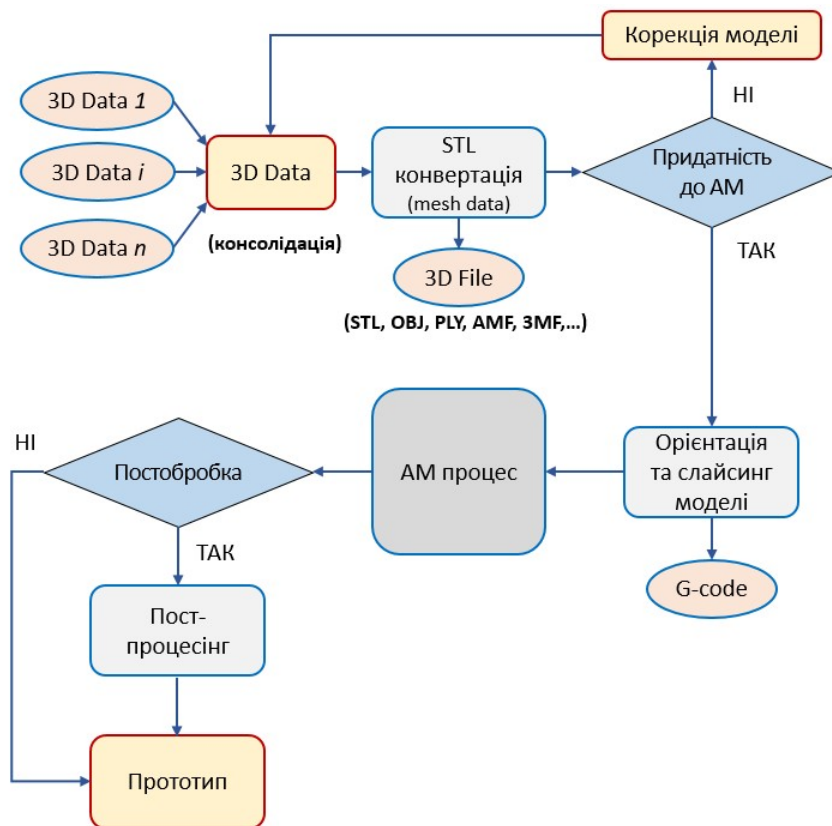


Рис. 1. Основні етапи та елементи АМ процесу

За багатьох процесів адитивного виробництва, виріб являє собою чорновий зразок, з чорновими розмірами та грубими поверхнями, швидке створення яких може бути забезпечено адитивним виробництвом. На кінцевих етапах процесу виготовлення, деталі можуть зажадати ретельного очищення і подальшої обробки, шліфування, підготовку поверхні та забарвлення перед своїм використанням. Тут, також, адитивне виробництво може бути більш вигідним, в силу своєї можливості створення складних геометричних форм без інструментальної обробки.

Результат реінжинірингу залежить від детального аналізу кожного його етапу та вибору стратегії САД підготовки, процесу друку та постобробки. Тут, сам процес пошарової побудови чи 3D друку, після отримання 3D машиною цифрових даних побудови, мало залежить від користувача, що вигідно вирізняє адитивне виробництво від інших виробничих процесів. Можливі похибки на цьому етапі мінімізуються. Важливими є етапи, так званого препроцесінгу, якраз прийняті тут рішення і визначають загальну стратегію прототипування. Для виробів машинобудівного призначення актуальним буде інженерний аналіз, який визначить методи збору цифрових даних та САД моделювання, варіанти цифрових форматів, просторову орієнтацію моделі та напрям пошарового синтезу, можливі матеріали, а відповідно і загалом вид технології адитивного виробництва. В машинобудівних задачах на етапі збору інформації про об'єкт актуальним є аналіз можливих способів, якими був виготовлений цей об'єкт. Тут, стратегії реінжинірингу пов'язують з методами навчання, що полягають у комплексному аналізі виробу, складу матеріалів, технологій, з

формуванням не просто CAD даних, а і опису виробничих процесів – CAE/CAM даних. Тобто зворотній інжиніринг для індустріальних процесів це не просте копіювання створеного раніше виробу, а отримання знань про те, яким чином цей виріб був виготовлений. Така стратегія дозволить покращити виріб та знайти нові рішення щодо його виробництва.

Важливим етапом RE процесів є оцифрування фізичного об'єкту (отримання та моделювання форми) та його віртуальне представлення. Для цього можливе застосування контактних датчиків, що широко використовуються для вимірювання механічних деталей у промисловості. Проте, для деталей складної форми, більше підходять безконтактні датчики та 3D сканери. Оцифрування дозволяє контролювати деталі, порівнювати результат оцифрування з еталонною CAD моделлю та вимірювати точні геометричні характеристики. Але оцифрування за допомогою безконтактного датчика залишається складним процесом.

Сьогодні на ринку 3D технологій отримали широке застосування активні системи 3D сканування зі структурованим світлом [2]. 3D сканери зі структурованим світлом працюють за методом захоплення всього поля опромінення, що зменшує час сканування в порівнянні з лазерними системами. Структурований світловий потік (малюнок) спрямовується на об'єкт за допомогою LCD проектора або іншого стабільного джерела світла (рис. 2) та аналізується деформація малюнка на об'єкті. Камера, зміщена від джерела світла, спрямована на форму візерунка під кутом (β) та обчислює відстань до кожної точки в полі зору.

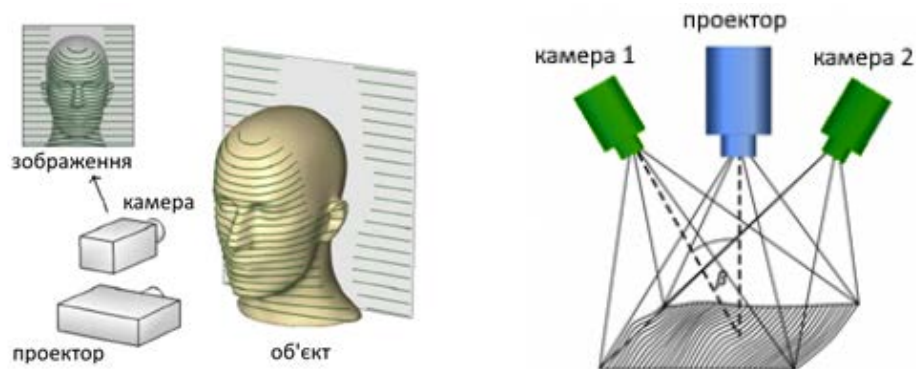


Рис. 2. Принцип роботи оптичного 3D сканера зі структурованим світлом

Зворотна інженерія з використанням оптичних структурованих 3D сканерів дозволяє досягати високої роздільної здатності, що важливо за потреб захоплення дрібних елементів деталей. Проте, точність сканування (рис. 3) може поступатися лазерним сканерам. Для мінімізації останнього виконують сканування з багатьох ракурсів, з наступною консолідацією отриманих хмар точок та корекцією точкових даних.

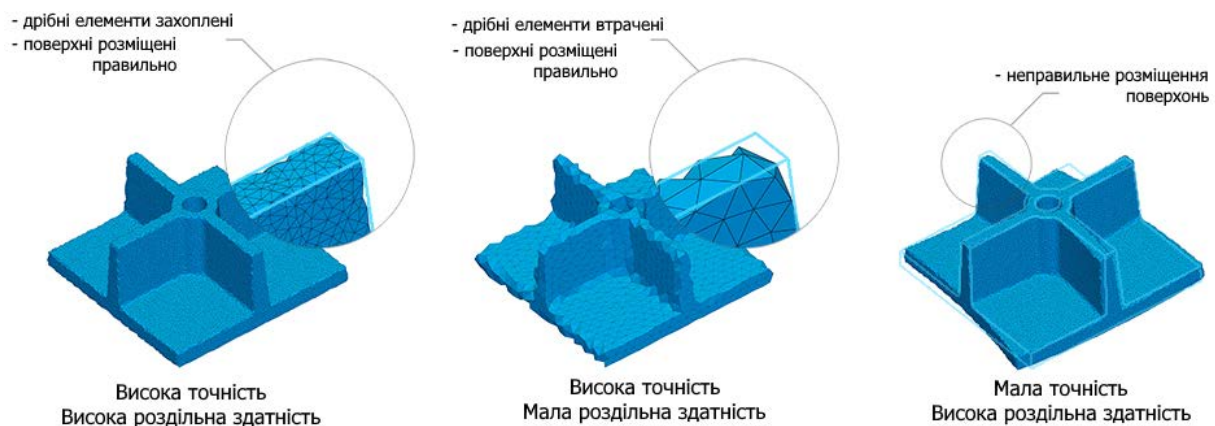


Рис. 3. Точність та якість полігональних моделей

Слід зазначити, що ступінь деталізації, так важлива для візуалізації 3D об'єктів, може не мати такої актуальності у випадках реінжинірингу, кінцевою метою якого є виготовлення об'єкту одним зі способів адитивного виробництва. Зокрема, для звичайних процесів FDM, ступінь деталізації конструктивних елементів деталі може бути спотворена товщиною шарів пластику, що наносяться

соплом екструдера. В даному випадку більш актуальною є геометрична точність 3D сканування, що в звичайних оптичних сканерах компенсується алгоритмами обробки точкових даних та багатопозиційним скануванням об'єкту.

В деяких задачах точність сканування оптичними сканерами може не задовольняти інженера. Таким чином, за вибору стратегії реінжинірингу, що передбачає повну автоматизацію отримання цифрової моделі, слід уважно обирати методи 3D сканування. Часто така стратегія є виправданою в аматорстві, де основною задачею є отримання звичайної копії виробу, без точного відтворення всіх конструктивних елементів оригіналу.

Для прикладу, у роботі отримували цифрову модель важеля подачі акумуляторного клейового пістолета Bosch GluePen (рис. 4). Аналіз геометрії, матеріалу та основних конструктивних поверхонь, показав, що важіль виготовлений методом екструзії пластику у формах для лиття під тиском. Функціонально важіль приводить в рух механізм подачі клейового стрижня у блок нагріву та під час роботи зазнає згинального навантаження. Як помилку виробника, слід відмітити відсутність блокування руху важеля за умов повного розрідження клею у нагрівальній камері, тобто не досягнення робочої температури блоку нагріву. Неуважність користувача та прикладання надмірних зусиль викликали руйнування важеля в зоні дії найбільшого згинального моменту, це місцеве заглиблення для входу колінного шарніру механізму подачі, що розташоване в середній його частині.



Рис. 4. Важіль подачі клейового пістолету (місце руйнування)

Використовували дві стратегії реверс інжинірингу: оцифровування хмар точкових даних, отриманих за допомогою оптичного сканера моделі EinScan-SE фірми Shining 3D; ручна реконструкція з використанням твердотільного моделювання у CAD редакторі.

Принциповий аналіз об'єкту та його функціоналу, а також можливості EinScan-SE, як активної системи сканування зі структурованим світлом дає надію на адекватність результату реалізації першої стратегії. Слабкою стороною цього варіанту реінжинірингу є колірна температура об'єкту: важіль виготовлений з темного, чорного пластику, що послаблює температурну насиченість променів структурованого світла сканера та може ускладнити збір хмар точок під час сканування. Як відомо деталі чорного кольору мають проблеми сканів у випадку використання оптичних активних 3D сканерів [6]. Окремою проблемою може стати також недостатня матовість зовнішніх та глянець внутрішніх поверхонь деталі. Глянцеві темні поверхні взагалі нездатні формувати хмари точок в оптичних системах сканування.

Ці особливості здатні вкрай ускладнити швидке та якісне формування цифрової моделі, що може викликати навіть зміну стратегії реверс інжинірингу. Зокрема, в процесі синтезу 3D моделі нами була використана стратегія прямого CAD моделювання з використанням примітивів у просторових редакторах. Як відомо, такий процес реінжинірингу є вкрай трудомістким та зайняв багато часу на побудову моделі. Цю стратегію можна виправдати за умов виробництва великої кількості деталей одного прототипу з визначеною геометрією. Також, на перевагу стратегії, може бути використана потреба у наступній корекції геометрії моделі, зміни її конструкції та дизайну, на випадок еволюції самого виробу чи механізму, в якому вона застосовується.

У першому варіанті прототипування важеля здійснювали в автоматичному режимі сканування об'єкту системи Shining EinScan-S, з поворотом столу на 360° та без врахування текстур. За результатами сканування (рис. 5) встановлено, що навіть за умов повільного сканування з кроком

повороту стола у 10° , для оригіналу деталі без підготовки поверхонь, важко отримати потрібну кількість точок, за якими програма могла б здійснити відтворення хоча б примітивної геометрії важеля. На таку ситуацію мало впливає навіть режим HDR сканеру, що працює у високому динамічному діапазоні світлового поля: отримана хмара точок скану мала густину, недостатню для відтворення потрібної геометрії.

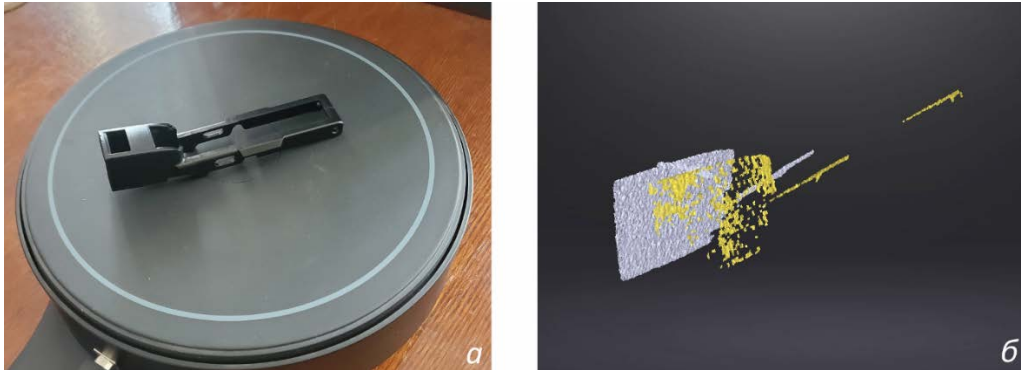


Рис. 5. Результат сканування деталі без обробки поверхні

Кардинально виправити ситуацію можна використанням аерозолію чи спреїв для матування поверхонь. Нанесений шар ефективно матує поверхню, що сприяє поглинанню падаючих світлових променів та дозволяє камерам сканеру з легкістю фіксувати всі тонкощі геометрії деталі. Спеціалізовані спреї є досить ефективними, але й дорогими. У нашому випадку було використано спосіб покриття поверхонь деталей звичайною акриловою суспензією білого кольору без глянцевого ефекту. Суспензію наносили пензликом (рис. 6), розрівнюючи на плоских ділянках. Основним результатом тут є матовість поверхонь та їх високий температурний колір, що сприятливо впливає на результат оптичного сканування з використанням структурованого світла.

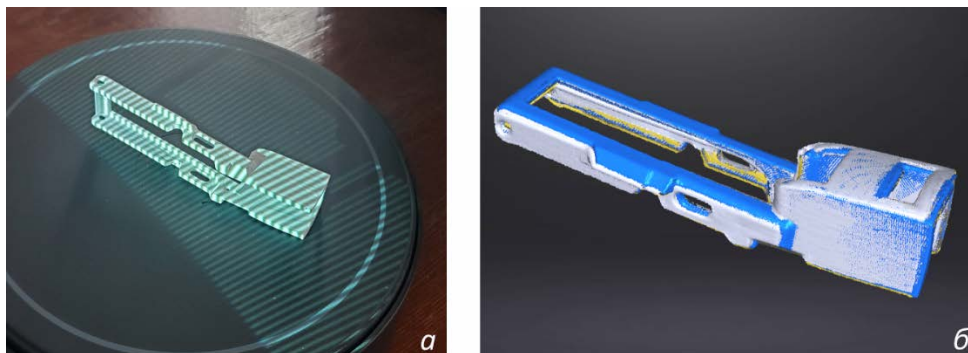


Рис. 6. Результат сканування деталі після матування поверхні

Сканування підготовленого таким чином об'єкту дозволило легко отримати три групи хмар точок, зі скануванням важеля у різних положеннях. Об'єднання груп в автоматичному режимі системи дало якісний результат, було отримано консолідацію поверхонь, яка мала практично замкнений геометричний об'єм.

Накладання 3D сканів у програмі EinScan-S реалізовано за послідовною схемою. Отримані групи хмар точкових даних для двох сканів з різних ракурсів об'єднувались в автоматичному режимі на основі характеристик. Лише після виконання консолідації попередніх двох сканів є можливість додавання наступного третього скану, отриманого під іншим ракурсом розміщення деталі на поворотному столику. Об'єднанням декількох 3D сканів можна досягати більшої точності сканування. На цьому етапі реконструкції встановлено, що за умов матування поверхні пластику для отримання якісної полігональної моделі достатньо двох сканів, з використання максимальної кількості поворотів стола (36 , з кроком 10°). Враховуючи, що на отримання одного скану витрачається чимало часу, який залежить від обчислювальної потужності комп'ютера, вибір кількості сканів та повороту столика сканеру напряму впливають на продуктивність та вартість процесу RE. Зрозуміло, що ця обставина має бути врахована у загальній стратегії реінжинірингу, та вона є залежною від складності геометрії деталі й стану її поверхні.

Після фази збору необхідний етап попередньої обробки, щоб підготувати отримані 3D дані для наступних операцій. Цей крок є частиною кожного процесу RE, часто є простою програмною реалізацією та іноді виконується безпосередньо програмним забезпеченням 3D сканера. На цьому етапі виконується зменшення кількості отриманих точок, реєстрація хмар точок і процес згладжування. Це лише деякі з типових процесів, які виконуються для того, щоб зменшити помилки й складність цифрових даних, та, з рештою, отримати придатну основу для сегментації, тобто формування полігональної моделі, або ж STL файлу.

Отримана таким чином полігональна модель може містити надмірно велику множину *mesh* даних. Це збільшує розмір файлу STL моделі та значно ускладнює подальшу роботу, аж до блокування програмного забезпечення для слайсингу, не говорячи вже про цифрову обробку моделі та її параметризацію, за потреби. Як відомо, більшість програм слайсерів для FDM друку задовільно справляються з файлами твердотільних моделей, розмір яких не перевищує 25 Мб. виправити положення можна безпосередньо у програмі сканування EinScan-S, вибравши функцію спрощення у процесі постобробки моделі. Так можна забрати артефакти на плоских поверхнях моделі, що виникають як наслідок фіксації текстур акрилової фарби, залишені пензликом (рис. 7).

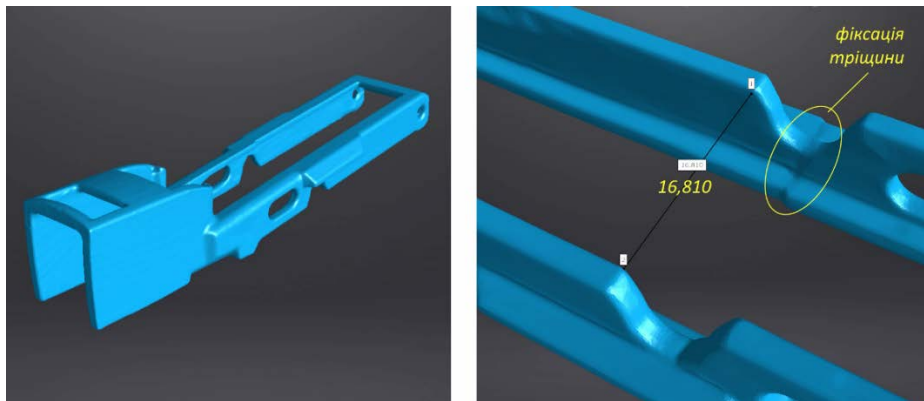


Рис. 7. Полігональна STL модель важеля

Фазу корекції моделі продовжили у зовнішньому редакторі *mesh* даних MeshLab [9]. Робота полягала у видаленні артефактів, згладжуванні, що відповідно дало зменшення розміру файлу моделі. Проте, головним завданням було корекція та реконструкція цілісності моделі за ознаками функціональності деталі у виробі. Як видно з рисунку 7 (праворуч), у *mesh* даних зафіксовано зміщення у тілі моделі, причиною якого є тріщина на оригіналі. З аналізу інженерних даних, зрозуміло, що такий дефект можна усунути банальним копіюванням цілісної частини моделі, адже важіль є симетричним за конструктивними ознаками. Подібну корекцію часто застосовують у стратегіях реінжинірингу деталей з втраченими чи пошкодженими симетричними елементами.

Подібна постобробка дозволяє отримати придатну до FDM друку 3D модель деталі та не займає багато часу. Але функціональність моделі з огляду на глобальну корекцію геометрії та конструктивної еволюції виробу, за потреби, є обмеженою, адже модель являє собою полігональне тіло, а не CAD модель з параметричним набором даних. Для отримання повноцінної CAD модель важеля, як вже відмічалось, в роботі паралельно використовували іншу стратегію побудови в інженерній системі Solidworks, на основі прямих обмірів та послідовним параметричним моделюванням, з використанням примітивів. Такий процес є досить кропітким та тривалим, відповідно, цю стратегію можна запропонувати для геометрично простих інженерних виробів, чи у випадку потреби внесення постійних змін у геометрію конструктивних елементів. Наявність базової параметричної моделі тут значно полегшує роботу, адже ми маємо дерево побудови з конкретними геометричними примітивами, поверхні яких визначені математично, наприклад на основі *B-Spline* або *NURBS* кривих.

Слід зазначити, що у практиці реінжинірингу, останнім часом, застосовують ще одну стратегію реконструкції, яка поєднує елементи попередніх стратегій. Для її реалізації необхідне спеціалізоване програмне забезпечення (Geomagic Design X, Polyworks, Autodesk Powershape) та значні потужності апаратних систем обчислень [6]. Хоча в роботі цю стратегію не використовували, але суть її полягає в отриманні полігональних цифрових моделей, з використанням методів 3D сканування, та наступного перетворення моделі у параметричну, за допомогою програмних

алгоритмів комплементції сегментованих поверхонь та математичних сплайнів. Постійне вдосконалення алгоритмів та збільшення обчислювальних потужностей комп'ютерів дозволяє з успіхом застосовувати таку стратегію реінжинірингу для індустріальних задач з високим ступенем комерціалізації кінцевого продукту. З метою зменшення інвестиційного навантаження у задачах інженерної реконструкції зустрічається також застосування програмних модулів та додатків (Solidworks ScanTo3D, Siemens NX, Autodesk Fusion 360), в яких процес детермінації просторових 3D даних є напівавтоматичним.

Висновок. Отже, на вибір стратегії реверс інжинірингу впливають багато факторів. Це і сам зміст задачі відтворення об'єкту (велике комерційне замовлення, власний проект, чи одиничний ремонт), це і функціональність та геометрія виробів, їх ступінь інженерії, а також, як і матеріал прототипу, так і матеріал відтворення об'єкту у процесі самого 3D друку. Саме в інженерних задачах, часто переслідується повноцінне параметричне моделювання, що обумовлено потребами змін конструктивних елементів, адаптації до еволюції вузлів машин, з метою їх просування на ринок, з рештою створення електронних баз даних конструктивних елементів, потреби у симуляції, тощо. У цьому випадку доцільні стратегії параметричного моделювання чи реінжиніринг на основі автоматичної ідентифікації профілів сегментованих поверхонь. Повна та вичерпна ідентифікація стратегій реінжинірингу в машинобудуванні є справді складним завданням через низку специфічних ознак, які можна прийняти як дискримінаційні фактори. Для простих же задач реінжинірингу просторово складних об'єктів машинобудівного застосування більш доцільною є перша стратегія, реалізована у роботі для важеля клейового пістолету. Хоча профілі поверхонь не є математично визначеними, а гострі елементи містять артефакти, для задач FDM друку, навіть інженерного призначення, така стратегія є цілком прийнятною. Особливості екструзії філаменту, як правило нівелюють більшість артефактів моделі. Однак, у алгоритм стратегії доцільно ввести окремий етап для підготовки оригіналів, що пов'язаний з матуванням блискучих поверхонь та збільшенням температурного кольору темних ділянок. Це спростить задачу збору хмар точок, придатних для нормальної їх консолідації, з наступною сегментацією та генерацією параметричних моделей, що загалом прискорить процес створення STL моделей, придатних для 3D друку.

Список використаних джерел:

1. Additive Manufacturing Technologies / Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker, Mahyar Khorasani // Springer, Cham, 2021. – p. 675, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>.
2. Адитивні технології та матеріали: навч. посібник / Д.А. Гусачук, М.Д. Мельничук, В.М. Малець. – Луцьк : ЛНТУ, 2022. – 272 с. ISBN 978-617-8018-36-8.
3. Additive Manufacturing: A Tool for Industrial Revolution 4.0 / Manjaiah, M. Raghavendra, K. Balashanmugam, N. Davim, P.J., Woodhead Publishing Reviews: Mechanical Engineering Series. 2021, p. 324. ISBN: 978-0-12-822057-3.
4. Гречко А.М. Сучасні адитивні технології та 3D-друк. Огляд останніх досягнень в різних сферах людського життя // Вісник НТУ «ХП». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2019. – №1. – С. 63-75. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2019.1.12>.
5. Адитивні технології полімерних матеріалів (Огляд) / О.П. Масючок, М.В. Юрженко, Р.В. Колісник, М.Г. Кораб // "Автоматичне зварювання", 2020. – № 5. – С. 53-60. <https://doi.org/10.37434/as2020.05.08>.
6. F. Buonamici, M. Carfagni, R. Furferi, L. Governi, A. Lapini, Y. Volpe (2018) Reverse engineering modeling methods and tools: a survey. Computer-Aided Design & Applications, 2018, 15(3), P.443–464. <https://doi.org/10.1080/16864360.2017.1397894>.
7. Gerbino, S., Martorelli, M. (2023). Reverse Engineering. In: Pei, E., et al. Springer Handbook of Additive Manufacturing. Springer Handbooks. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20752-5_16.
8. Saiga, K.; Ullah, A.S.; Kubo, A.; Tashi. A Sustainable Reverse Engineering Process. Procedia CIRP Volume 98, 2021, PP 517-522. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.144>.
9. MeshLab. Url - <https://www.meshlab.net>.