

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2020-41-09>

УДК: 004.94

Лазебний Валентин Миколайович, старший науковий співробітник

<http://orcid.org/0000-0002-2597-8203>

Досенко Сергій Дмитрович, старший науковий співробітник

<http://orcid.org/0000-0001-6707-2840>

Білевська Олена Станіславівна, науковий співробітник

<http://orcid.org/0000-0002-2081-1906>

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

ПРИНЦИПИ 3D МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ 3D ПРИНТЕРА

Лазебний В.М., Досенко С.Д., Білевська О.С. Принципи 3d моделювання механічних деталей для застосування 3d принтера. Розкрито принципи 3D моделювання механічних деталей для застосування 3D принтера. Визначено поняття «3D принтер», зазначено, що 3D принтер використовує метод пошарового створення фізичного об'єкта по цифровій 3D-моделі. Запропоновано опис тривимірного друку, такого як швидке прототипування, зазначається, що дана технологія має широкі перспективи розвитку та впровадження, тому що має ряд переваг, у порівнянні з традиційними методами створення різних деталей. Наведено класифікацію 3D принтерів за призначенням (орієнтація на споживача) та за технологією друку у вигляді таблиці. Охарактеризовано цифрові 3D технології і когнітивне програмування, які відкривають унікальні можливості відтворення найскладніших просторових форм, об'єктів та інженерних конструкцій, механізмів, та наголошується, що реалізація цих можливостей пов'язана з цифровою технологією управління матеріальними частками в об'ємному середовищі інструментів 3D технології. Визначено способи 3D-моделювання механічних деталей: 3D-моделювання у програмі КОМПАС-3D; 3D-сканування за допомогою 3D сканера. Окреслено можливості системи тривимірного моделювання, які забезпечують проектування машинобудівних виробів будь-якої складності і відповідно до самих передових методик проектування. У системі присутні інструменти для роботи за методом «зверху вниз», або методикою низхідного проектування, а також за методом «знизу вгору». Визначено принципи сканування деталі з чотирьох сторін на 3D-сканері Artec за допомогою поворотного столу, де точність сканування для даного 3D-сканера становить до 0,1% від розміру сканованого об'єкта. Наголошено, що сканування можна застосовувати для створення точних моделей складнопрофільних об'єктів, які в подальшому можуть бути використані для отримання прототипів виробу, побудови нових виробів на базі існуючих.

Ключові слова: тривимірний сканер, механічна деталь, 3D моделювання, інструмент, принтер, когнітивне програмування, стереолітографія.

Лазебний В. Н., Досенко С. Д., Білевська Е. С. Принципы 3D моделирование механических деталей для применения 3D принтера. Раскрыты принципы 3D моделирование механических деталей для применения 3D принтера. Определено понятие «3D принтер», указано, что 3D принтер использует метод послойного создания физического объекта по цифровой 3D-модели. Предложено описание трехмерной печати, такого как быстрое прототипирование, отмечается, что данная технология имеет широкие перспективы развития и внедрения, так как имеет ряд преимуществ, по сравнению с традиционными методами создания различных деталей. Приведена классификация 3D принтеров по назначению (ориентация на потребителя) и по технологии печати в виде таблицы. Охарактеризованы цифровые 3D технологии и когнитивное программирование, которые открывают уникальные возможности воспроизведения сложных пространственных форм, объектов и инженерных конструкций, механизмов, и отмечается, что реализация этих возможностей связана с цифровой технологией управления материальными частицами в объемном среде инструментов 3D технологии. Определены способы 3D-моделирования механических деталей: 3D-моделирование в программе КОМПАС-3D; 3D-сканирование с помощью 3D сканера. Определены возможности системы трехмерного моделирования, обеспечивающих проектирование машиностроительных изделий любой сложности и в соответствии с самых передовых методик проектирования. В системе присутствуют инструменты для работы по методу «сверху вниз», или методике нисходящего проектирования, а также по методу «снизу вверх». Определены принципы сканирования детали с четырех сторон на 3D-сканере Artec с помощью поворотного стола, где точность сканирования для данного 3D-сканера составляет до 0,1% от размера сканируемого объекта. Отмечено, что сканирование можно применять для создания точных моделей сложнопрофильных объектов, которые в дальнейшем могут быть использованы для получения прототипов изделия, построения новых изделий на базе существующих.

Ключевые слова: трехмерный сканер, механическая деталь, 3D моделирование, инструмент, принтер, когнитивное программирование, стереолитографии.

Lazebnyi V., Dosenko S., Bilevska O. Principles of 3D modeling of mechanical parts for use of the 3d printer. The principles of 3D modeling of mechanical parts for the application of a 3D printer are revealed. The

concept of "3D printer" is defined, it is noted that the 3D printer uses the method of layer-by-layer creation of a physical object on a digital 3D-model. A description of three-dimensional printing, such as rapid prototyping, is proposed, noting that this technology has broad prospects for development and implementation, because it has a number of advantages over traditional methods of creating various parts. The classification of 3D printers by purpose (consumer orientation) and by printing technology in the form of a table is given. Digital 3D technologies and cognitive programming are characterized, which open unique possibilities of reproduction of the most difficult spatial forms, objects and engineering constructions, mechanisms and it is emphasized that realization of these possibilities is connected with digital technology of management of material particles in 3D environment of 3D technology tools. Methods of 3D-modeling of mechanical parts are determined: 3D-modeling in the program COMPASS-3D; 3D scanning with a 3D scanner. Possibilities of the system of three-dimensional modeling which provide designing of machine-building products of any complexity and according to the most advanced design techniques are outlined. The system has tools for working by the method of "top down", or the method of downward design, as well as the method of "bottom up". The principles of scanning a part from four sides on an Artec 3D scanner using a rotary table are defined, where the scanning accuracy for this 3D scanner is up to 0.1% of the size of the scanned object. It is emphasized that scanning can be used to create accurate models of complex profile objects, which can then be used to obtain product prototypes, build new products based on existing ones.

Keywords: three-dimensional scanner, mechanical part, 3D modeling, tool, printer, cognitive programming, stereolithography.

Вступ та постановка проблеми дослідження. За останнє десятиліття цифрові технології зробили крок далеко вперед. Те, що ми вже вважаємо повсякденним і буденним, насправді є результатом довгих, наполегливих досліджень і експериментів. Сьогодні виготовлення різних промислових предметів або відновлення деталей стало можливим не тільки в заводських умовах, але і вдома, завдяки тривимірному друку, який активно входить у звичайне життя і стає невід'ємною його частиною для багатьох користувачів. Незважаючи на те, що 3D принтери з'явилися зовсім нещодавно, в ЗМІ все частіше з'являються повідомлення про різноманітні сфери їх застосування: техніка (виготовлення деталей, макетів, шаблонів), побут (друк іграшок, сувенірів, посуду і т.д.), отримання композитних матеріалів, виготовлення індивідуальних протезів і навіть людських органів. Розглядається можливість використання принципу 3D друку при виготовленні будівельних конструкцій і житлових будинків, та найголовніше це виготовлення механічних деталей [1].

3D принтер – це периферійний пристрій, що використовує метод пошарового створення фізичного об'єкта по цифровій 3D-моделі. У зарубіжній літературі цей тип пристроїв називається фаббером, а процес тривимірного друку – швидке прототипування [2].

Дана технологія має широкі перспективи розвитку та впровадження, тому що має низку переваг, у порівнянні з традиційними методами створення різних деталей. Однією з таких переваг є наочність – деталь набагато простіше сприймати, коли вона є тривимірним об'єктом, а не коли вона представлена, наприклад, на кресленнях. Іншою перевагою є швидкість створення – найбільш яскраво це проявляється при виконанні складних деталей. Третьою перевагою є відсутність фізичних зусиль з боку людини. Роль людини в цьому процесі полягає у створенні віртуального макета, за допомогою якого-небудь графічного редактора, що дозволяє створювати 3D-моделі.

На сьогоднішній день сучасна промисловість стикається з такими проблемами, коли вийшла з ладу важлива деталь обладнання, відновлення якої неможливо, а покупка її викликає тимчасові матеріальні труднощі. Уявімо, що необхідна деталь з великою кількістю складних поверхонь, яку звичайним вимірювальним інструментом обмірити вкрай важко, щоб отримати результати необхідної точності. Потім за цими даними потрібно ще отримати математичну модель.

На відміну від традиційних методів виробництва швидке прототипування виробів не передбачає видалення матеріалу (фрезерування, свердління, сточування) або зміна його форми (штампування, кування, вигин, розкочування). Об'ємне прототипування виробів виконується шляхом пошарового нарощування матеріалу, з якого складається модель, до утворення єдиного цілого – готового виробу [3].

Особливість технології знімає всі обмеження на внутрішню структуру одержуваної моделі, тому дана технологія має перспективу використання для отримання складних конфігурацій виробів. Наразі існує декілька напрямків, що дозволяють реалізувати технологію швидкого прототипування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останнє десятиліття, чимало вчених, як зарубіжних, так і вітчизняних, здійснили відкриття у сфері 3D моделювання.

О.В. Струтинська [4]дослідила сучасний стан і перспективи розвитку технологій тривимірного моделювання й друкування Авторкою подано характеристику апаратного та

програмного забезпечення функціонування зазначених технологій, етапи процесу тривимірного друкування, а також охарактеризовано галузі їх використання.

Р. П. Мігущенко, М. І. Опришкіна, К. Ю. Куштим [5] розкрили перспективність FDM технологій у 3D друці. Авторами слушно зазначено, що на сьогоднішній день активно розробляються сучасні технології швидкого прототипування, що дозволило змодельовати 3D-зображення об'єкта. Описано 3D-принтери, що використовують технологію швидкого прототипування для відтворення твердотільних елементів. Процес друку є серією повторень циклів, пов'язаних зі створенням тривимірних моделей шляхом нанесення на стіл (ліфт) витратних матеріалів шарового принтера.

Сучасні адитивні технології та 3D друк наводить О.М. Гречко [6]. У роботі здійснено огляд останніх досягнень в різних сферах людського життя. На основі опублікованого у відкритих інформаційних джерелах численого матеріалу наведено короткий науково-технічний огляд останніх досягнень в області сучасних адитивних технологій, як в різних галузях промисловості, так і в сферах людського життя. Представлені найвагоміші розробки дослідників з усього світу в галузях медицини та протезування, архітектури та будівництва, проаналізовано технології створення металевих деталей з використанням адитивних технологій. Проведений аналіз прикладів впровадження адитивних технологій в світі засвідчив важливу необхідність недопущення відставання вітчизняної промисловості, а також науки і освіти від актуальних тенденцій застосування 3D-принтерів. Показано переваги і недоліки адитивних технологій у порівнянні з традиційними способами виробництва.

П. Ф. Зозуля, О. С. Поліщук, А. О. Поліщук [7] провели аналіз сучасного стану легкої промисловості та перспективи її розвитку за допомогою новітніх технологій. Розглянуто області застосування технології 3D друку у різних галузях промисловості та приведені характерні напрямки її застосування в легкій промисловості, зокрема під час виготовлення одягу і взуття та деталей у галузевому машинобудуванні.

Із зарубіжних робіт варто відзначити роботи: В. Garret, В. Redwood, F. Schöffner [8], S. Bhandari, В. Regina [9].

Однак, незважаючи на всю масштабність наявних наукових досліджень за темою, питання дослідження принципів 3D моделювання механічних деталей для застосування 3D принтера залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

Мета статті полягає у розкритті принципів 3D моделювання механічних деталей для застосування 3D принтера. Завданнями дослідження є:

- розкрити поняття та принципи 3D моделювання;
- здійснити класифікацію 3D принтерів за призначенням (орієнтація на споживача) та за технологією друку;
- запропонувати принципи 3D моделювання механічних деталей для застосування 3D принтера.

Викладення основного матеріалу дослідження. Тривимірний друк стає все більш популярним і дешевим, доступним для більшості середніх виробничих підприємств, і, навіть, звичайного користувача. За допомогою 3D-принтера можна у короткі терміни повністю розробити проект: створити макет і отримати дослідний зразок, провести потрібні випробування зразка ще до виготовлення готової продукції, і навіть застосовувати за призначенням, якщо він виконаний з придатного матеріалу. Використання 3D-друку для швидкого прототипування істотно скорочує час і здешевлює процес створення продуктів, а так само дозволяє запобігати ряду конструкційних проблем ще на стадії моделювання.

Сьогодні, пропоновані до продажу 3D принтери по їх споживчими якостями достатньо різноманітні. За їх призначенням класифікація представлена у таблиці 1 [4, 6].

Перші ідеї по тривимірному друку відносяться до 80-х років ХХ століття. Саме в той період часу було створено стереолітографію, яка створювала об'єкти за допомогою спеціального фотополімерного пластика. Це була перша технологія, що стала основою для сучасних 3D принтерів: лазер променем прорисовував кожен піксель малюнка, створюючи його з рідкої речовини, яка, завмерши, ставала твердим елементом об'єкта.

Таблиця 1

Класифікація 3D принтерів за призначенням (орієнтація на споживача)

Тип принтера	Цільова аудиторія	Особливості
Споживчий	На людей, що працюють вдома.	Простий, зрозумілий інтерфейс. Друкують ABS і PLA пластиком. Процес друку тривалий. Орієнтовані на друк нескладних об'єктів.
Персональний	На малий бізнес з невеликим бюджетом, з потребою в періодичному використанні 3D друку.	3D принтери володіють більш високою якістю і точністю друку.
Професійний	На компанії з постійною потребою в прототипуванні, моделюванні, виготовленні різного роду об'єктів з високими показниками якості і точності.	Дуже габаритні і галасливі. Можуть виробляти кілька різних об'єктів одночасно. Потрібен навчений оператор для роботи на такому принтері.
Промисловий	На компанії з потребою у виробництві високоточних, високоякісних продуктів великого розміру або обсягу.	Є сукупністю точності і якості. Велика площа друку. Може швидко змінювати профіль і використовувати матеріали від ABS пластику до титану.

Сьогодні основою для створення моделей на 3D принтерах можуть бути різноманітні матеріали: кілька видів пластику, гіпс, віск, фотополімери, метал і т.д. Сьогодні виробники активно створюють для 3D принтерів нові компоненти і матеріали, що дозволяють отримувати все більш реалістичні зразки. У залежності від використовуваного матеріалу виділяють ряд різних технологій друку. Їх систематизація представлена в таблиці 2.

Цифрові 3D технології ікогнітивне програмування відкривають унікальні можливості відтворення найскладніших просторових форм, об'єктів та інженерних конструкцій, механізмів. Реалізація цих можливостей пов'язана з цифровою технологією управління матеріальними частками в об'ємному середовищі інструментів 3D технології, де здійснюється технологічний процес, який визначає властивості відтвореного об'єкта. Інновації індустриальних технологій ведуть до зламу звичних виробничих ланцюжків і тягнуть за собою новий етап розвитку світової цивілізації [4, 6].

Таблиця 2

Класифікація 3D принтерів за технологією друку

Назва технології	Опис технології
I. Принтер екструзійного типу	
FDM (Fuseddepositionmodeling)	Робочий елемент принтера - головка-екструдер, яка плавить пластикову нитку, якою заправляється принтер. Далі розплавлений елемент подається через сопло, а потім досить швидко застигає при кімнатній температурі. Замість пластику може бути використаний і інший матеріал, наприклад віск або керамічна суміш.
технологія PolyJet	Фотополімер маленькими дозами «вистрілюється» з тонких сопел, як при струменевому друці, і відразу полімеризується на поверхні пристрою під впливом УФ випромінювання. Важлива особливість, що відрізняє PolyJet від стереолітографії, є можливість друку різними матеріалами.
LENS (Laserengineerednetshaping)	Матеріал у формі порошку вивуається з сопла і потрапляє на сфокусований промінь лазера. Частина порошку пролітає повз, а та частина, яка потрапляє у фокус лазера миттєво полімеризується і шар за шаром формує тривимірну деталь.

II. Принтер типу, що спікається	
SL (Stereolithography)	Є невелика ванна з рідким полімером. Промінь лазера проходить по поверхні, і в цьому місці полімер під впливом УФ спікається. Після того як один шар готовий платформа з деталлю опускається, рідкий полімер заповнює пустоту далі запікається наступний шар
LS (Lasersintering)	Схоже на SL, тільки замість рідкого фотополімеру використовується порошок легкоплавкого пластику, який полімеризується лазером. Під дією лазера пластик плавиться, стає еластичним, а потім спікається в єдину масу. Щоб пластик під дією температури лазера не загорівся або не окислювався, в камеру, де проводяться роботи, додають азот (інертний газ).
III. Принтер типу, що склеює	
3DP (Threedimensionalprinting)	На матеріал в порошковій формі наноситься клей, який пов'язує гранули, потім поверх клеєного шару наноситься свіжий шар порошку
LOM (laminatedobjectmanufacturing)	Тонкі ламіновані листи матеріалу вирізаються за допомогою ножа або лазера і потім спікаються або склеюються в тривимірний об'єкт.

З одного боку, технологія когнітивного програмування є інноваційним процесом цифрової творчості, промислового і художнього виробництва в рамках цифрової програмованої технології [10]. З іншого, – ще до епохи Відродження природною формою відображення навколишнього світу і сприйняття натури були скульптури, ускладнюючи зрозвитком цивілізації процес когнітивної творчості [5].

Також як для систем тривимірного комп'ютерного моделювання просторових об'єктів постійно оновлюється палітра інструментів, для кожного напрямку 3D обладнання розробляються цифрові копії виробів – програмні прототипи їх відтворення. Інновації когнітивного програмування ведуть до тиражування складних просторових форм, навіть тих, які практично неможливо відтворити без використання технологій 3D прототипування [6,7].

Архітектура, неорганічні і органічні об'єкти [8], протоклітини [9], начинені електронікою роботи, все це області застосування цифрових програмованих технологій швидкого прототипування.

Завдяки 3D-моделюванню будь-яку деталь можна отримати двома способами:

3D-моделюванням в програмі КОМПАС-3D;

3D-скануванням за допомогою 3D сканера.

Розглянемо детальніше ці два способи на прикладі деталі «Колінчастий вал» (рис. 1).

Перший спосіб – це 3D моделювання в програмі КОМПАС-3D.

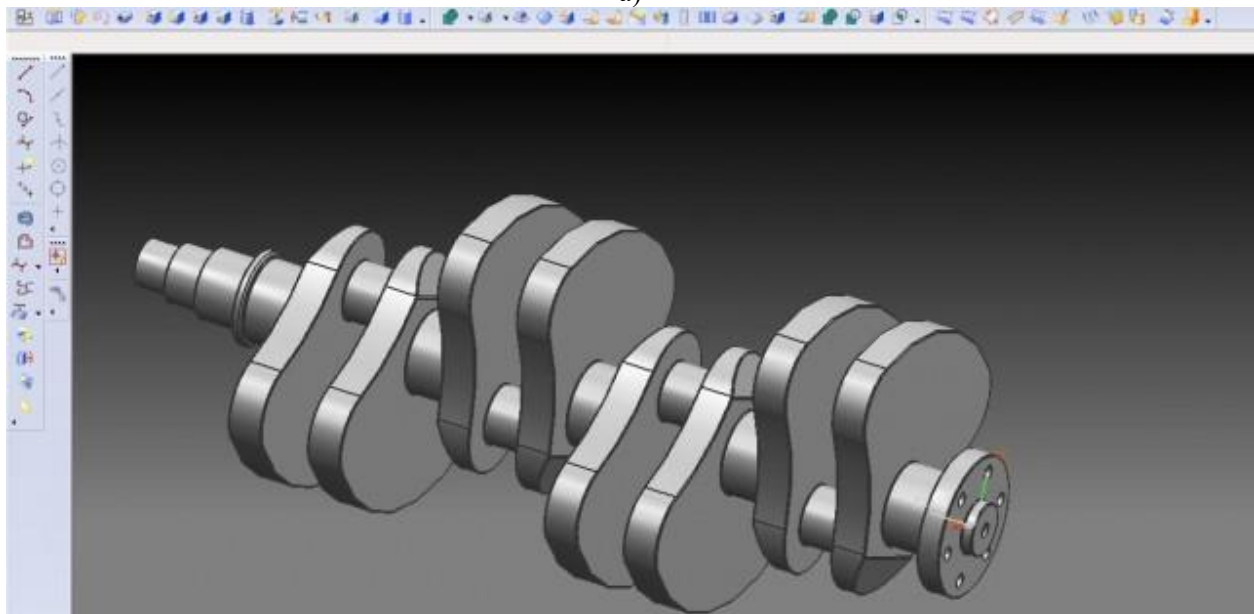
Дану деталь створено в програмі КОМПАС-3D по виміряним вимірювальним інструментом розмірами.

КОМПАС-3D – система тривимірного моделювання, що стала стандартом для тисяч підприємств завдяки вдалому поєднанню простоти освоєння і легкості роботи з потужними функціональними можливостями твердотілого і поверхневого моделювання.

Проектування машинобудівних і приладобудівних виробів накладає високі вимоги до використовуваного інструменту. Можливості системи забезпечують проектування машинобудівних виробів будь-якої складності і відповідно до самих передових методик проектування. В системі присутні інструменти для роботи за методом «зверху вниз», або методикою низхідного проектування, а також за методом «знизу вгору».



а)



б)

Рис. 1. 3D моделювання деталі Колінчастий вал
а) деталь Колінчастий вал
б) 3D модель деталі Колінчастий вал у програмі КОМПАС-3D

Другий спосіб – сканування деталі з чотирьох сторін на 3D-сканері Artec за допомогою поворотного столу (рис. 2). Точність сканування для даного 3D-сканера становить до 0,1% від розміру сканованогооб'єкта. Середня помилка для розміру 250мм – 0,1 мм.

Відскановані чотири види деталі необхідно з'єднати в одну цілу модель. 3D-сканер дозволяє в рази полегшити отримання математичної моделі, придатної для порівняння з еталонною моделлю. Також сканування можна застосовувати для створення точних моделей складно профільних об'єктів, які в подальшому можуть бути використані для отримання прототипів виробу, побудови нових виробів на базі існуючих.

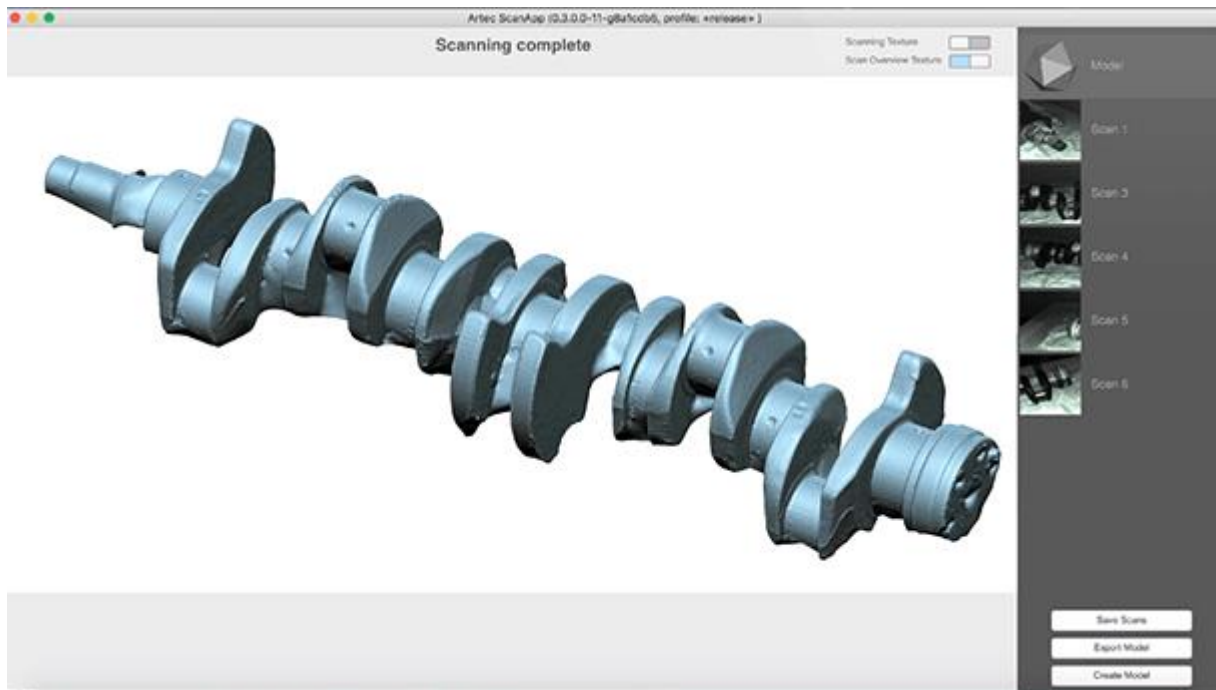


Рис. 2. 3D моделювання деталі Колінчастий вал на 3D-сканері Artec

3D-сканер є інноваційним пристроєм, за допомогою якого можна створювати точні тривимірні моделі реальних предметів з високим ступенем деталізації. Крім того, існує можливість отримання про них інформації. Зокрема, можна вивчити поверхню, форму і колір того чи іншого об'єкта в цифровому вигляді.

Тривимірні сканери необхідні для вирішення різних завдань в промисловості, науці, кіноіндустрії, медицині, мистецтві і багатьох інших областях [11].

Вони незамінні в тих випадках, коли необхідно зафіксувати форму об'єкта з високою точністю і за короткий проміжок часу. 3D-сканери дозволяють спростити і вдосконалити ручну працю, виконувати завдання підвищеної складності [1; 2]. Для того щоб відскановану деталь отримати повністю готовою із заданою точністю поверхні, її необхідно відправити на доопрацювання в програму Netfabb. В даному випадку моделі об'єкта з RVScanner експортуються в Netfabb, де проводиться глобальне зшивання і базова обробка, після чого група STL-файлів експортується в стороннє програмне забезпечення, де будується єдина модель і потім редагується (відбувається обрізка країв, встановлюється необхідна точність поверхні деталі, зберігається в потрібному форматі іт.д.).

Після 3D-сканування деталі отримуємо файли в різних розширеннях. Найчастіше 3D-сканери зберігають файли в форматах *.stl, *.obj, *.ply. Файли з цими розширеннями можна використовувати після 3D-сканування для 3D-друку або обробки на 3D-фрезері, але для САD-моделювання вони не підходять. Тому простим пере збереженням вирішити проблему не вийде. Існує особлива процедура перекладу одного формату в інший.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Технології 3D-прототипування бурхливо розвиваються: з'являються нові, удосконалюються старі, з'являються нові напрямки використання принципів 3D-прототипування. Межа розвитку галузі ще дуже далеко, тому в найближчому майбутньому можна чекати нових відкриттів в даній сфері. Застосування 3D-прототипування виробничому процесі дозволить полегшити сприйняття спроектованих виробів і підвищити якість виготовлення деталей.

У науковому напрямку 3D-прототипування – великий невивчений процес. Немає літературних даних про взаємозв'язок режимів друку з якістю одержуваного виробу. Також неясно, якими властивостями буде володіти отриманий виріб і як ці властивості змінюються в процесі експлуатації. Дана розробка дозволить розширити уявлення про можливості 3D друку, а також отримати економічний ефект. Використання програми дозволить отримувати моделі необхідної якості і тим самим розширити ринок збуту роздрукованих моделей.

Список бібліографічного опису

1. Гнатюк, Л. Р., Кучер, Б. А. (2018). Методи 3D моделювання для різних проектних завдань. Проблеми розвитку міського середовища, 2, 35-50.
2. Лебедева, О. О., Гумен, О. М. (2017). Адитивні технології в реставрації та відтворенні елементів архітектурних об'єктів. *Прикладна геометрія, дизайн, об'єкти інтелектуальної власності та інноваційна діяльність студентів та молодих вчених*: збірник доповідей VI Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. Київ, 269-274.
3. Осадча, К. П., Чемерис, Г. Ю. (2017). Добір засобів тривимірного моделювання для формування графічної компетентності майбутніх бакалаврів комп'ютерних наук. *Інформаційні технології і засоби навчання*, 62, 6, 70-85.
4. Струтинська, О. В. (2018). Сучасний стан і перспективи розвитку технологій тривимірного моделювання та друкування. *Науковий часопис НПУ імені М. П. Драгоманова. Серія 2 : Комп'ютерно-орієнтовані системи навчання*, 20, 88-94.
5. Мигущенко, Р. П., Опришкина, М. И., Куштым, К. Ю. (2016). Перспективність FDM технологій в 3D печаті. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія : Нові рішення в сучасних технологіях. Харків. № 18.С. 148-152.
6. Гречко, О. М. (2019). Сучасні адитивні технології та 3D-друк. Огляд останніх досягнень в різних сферах людського життя. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. : Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. *Теорія і практика = Bulletin of the National Technical University «KhPI». Ser. : Problems of electrical machines and apparatus perfection. Theory and practice* : зб. наук.пр. Харків : НТУ «ХПІ», 1, 63-75.
7. Зозуля, П.Ф., Поліщук О. С., Поліщук А. О. (2017). Перспективи застосування технології 3d-друку в легкій промисловості. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. Хмельницьк., № 4. С. 102-104.
8. Garret B., Redwood B., Schöffner F. The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications, 2017. November 14.
9. Bhandari S., Regina B. (2014). 3D Printing and Its Applications. *International Journal of Computer Science and Information Technology Research*, 2, 2, 378-380.
10. Скиба, М.Є., Поліщук, О.С., Онофрійчук, В.І. (2016). Технічна творчість. Сучасні технології в механіці. Хмельницький : ХНУ, 214 с.
11. Сучасні технології тривимірного друку в машинобудуванні. (2020). URL: <http://pmoarv.pp.ua/index.php?r=conference%2Fconference-article%2Fview&id=10>. (дата звернення: 08.10.2020)

References

1. Hnatiuk, L.R., Kucher, B.A. (2018). 3D Modelling Methods for Various Design Specifications. *Problemy Rozvytku Miskoho Sredovyscha*, 2, 35-50.
2. Lebedieva, O.O., Humen, O.M. (2017). Additive Technologies in the Restoration and Reproduction of Elements of Architectural Objects. *Applied Geometry, Design, Intellectual Property and Innovative Activities of Students and Young Scholars: Collection of Reports of the VI All-Ukrainian Research and Training Conference of Students, Graduate Students and Young Scholars*. Kyiv, 269-274.
3. Osadcha, K.P., Chemeris, H.Yu. (2017). Selection of Three-Dimensional Modelling Tools for the Formation of Graphic Competence of Future Bachelors of Computer Science. *Information Technologies and Learning Tools*, 62, 6, 70-85.
4. Strutyńska, O.V. (2018). Current State and Prospects of Development of Three-Dimensional Modelling and Printing Technologies. *Scientific Journal of M.P. Drachomanov NPU. Series 2: Computer-Based Learning Systems*, 20, 88-94.
5. Migushchenko, R.P., Opryshkina, M.I., Kushtym, K.Yu. (2016). Promising FDM Technologies in 3D Printing. *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Series: New Solutions in Modern Technologies*. Kharkiv. No. 18. Pp. 148-152.
6. Grechko, O.M. (2019). Modern Additive Technologies and 3D Printing. Review of the Latest Achievements in Various Spheres of Human Life. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. Theory and Practice: Collection of Scientific Papers*, Kharkiv, NTU "KhPI", 1, 63-75.
7. Zozulia, P.F., Polishchuk, O.S., Polishchuk, A.O. (2017). Prospects for the Application of 3D Printing Technology in Light Industry. *Bulletin of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. Khmelnytsky, No. 4. Pp. 102-104.
8. Garret B., Redwood B., Schöffner F. The 3D Printing Handbook: Technologies, Design and Applications, 2017. November 14.
9. Bhandari S., Regina B. (2014). 3D Printing and Its Applications. *International Journal of Computer Science and Information Technology Research*, 2, 2, 378-380.
10. Skyba, M.E., Polishchuk, O.S., Onofriichuk, V.I. (2016). Technical Creativity. Modern Technologies in Mechanics. *Khmelnytskyi: KhNU*, 214 p.
11. Modern Technologies of Three-Dimensional Printing in Mechanical Engineering. (2020). URL: <http://pmoarv.pp.ua/index.php?r=conference%2Fconference-article%2Fview&id=10>. (retrieved: 08.10.2020)