

УДК 621.7.01

Сучасний стан адитивних технологій для виготовлення деталей і вузлів робототехніки

С.Г. Катріч, Д.О. Дмитрієв

Херсонський національний технічний університет, Херсон, Україна

Анотація. Проаналізовано підходи до класифікації деталей по методу використаних адитивних технологій. Дано перелік та коротку характеристику термопластичних матеріалів, зазначено, що завдяки адитивному виробництву об'єкти майже будь-якої форми можуть бути створені без використання інструментів. Складні об'єкти можуть бути виготовлені за один етап процесу, що скорочує час виробництва. Розглянуто існуючі методи створення 3D-моделей. Показано, що 4D AM – це процес, який передбачає друк з матеріалів, здатних трансформуватися з часом, або зі спеціальної системи матеріалів, які можуть змінювати форму, використовуючи чотири розміри, а друкована структура більше не є статичною. Наведена класифікація AM за принципом виробництва, перелічено існуючі недоліки адитивних технологій та вказано способи їх усунення, необхідність додаткової механічної обробки.

Ключові слова: 3D друк, термопластичні матеріали; металокераміка; FDM; SLS, комітет ASTM-F42, робототехніка.

Традиційні процеси виробництва компонентів засновані на використанні високопродуктивних джерел у поєднанні з елементами управління для досягнення дуже високого рівня точності та надійності. Використання комп'ютерних систем у поєднанні з іншими технологіями на основі мехатроніки на етапі проєктування, виробництва та моделювання виробів дозволило підвищити ефективність виробничої системи. Робототехніка відіграє важливу роль в автоматизації та в Індустрії 4.0. Робототехніка має бути здатна виконувати ті ж операції, що і люди, але з високою точністю, забезпечує виконання технологічних операцій як безлюдних технологій.

В роботі [1] розглянуто застосування адитивних технологій у виготовленні складних за конфігурацією деталей в галузі літако- та ракетобудування що працюють в екстремальних умовах, таких як сопла авіаційних та ракетних двигунів; деталі газотурбінних агрегатів, компресорів та інших.

В еволюції сучасного адитивного виробництва – від 3D-друку до 4D-друку – відбулися значні поліпшення, але технологія як і раніше призводить 3D-друк до технології 5-осьового адитивного виробництва. Все більше компаній адаптують 3d-принтери для підвищення точності та зменшення помилок 3D-друку. Крім того, адитивне виробництво порушує традиційні ланцюги постачань, дозволяючи виробляти продукцію поруч з тим місцем, де вона використовується. Це покращує економію як витрат, так і часу виконання замовлення.

Відповідно до принципу виробництва, метод 3D-друку включає моделювання осадження розплаву (FDM), стереолітографію (SLA), селективне лазерне спікання (SLS), струменевий друк, виготовлення ламінованих об'єктів (LOM) тощо. У порівнянні з іншими методами, FDM є одним з найбільш часто використовуваних методів через його простий принцип і низьку вартість матеріалів. Одна із загальних класифікацій базується на керівних принципах комітету ASTM-F42, і AM можна розділити на 7 категорій. Ці категорії включають фотополімеризацію в кубах (VP), струменеве нанесення матеріалів (Mj), струменеве нанесення сполучних речовин (Bj), екструзію матеріалів (Me), ламінування листів (SL) та порошковий шар (PBF). Дека. Ці категорії включають фотополімеризацію в кубах (VP), струменеве нанесення матеріалів (Mj), струменеве нанесення сполучних речовин (Bj), екструзію матеріалів (Me), ламінування листів (SL) та порошковий шар (PBF). Порядок цих категорій встановлюється відповідно до споживання енергії. Наприклад, у випадку фотополімеризації кубів (зазвичай лазер

потужністю 40-50 МВт) потрібна мінімальна кількість енергії, необхідної для затвердіння шару, тоді як DED споживає велику кількість енергії.

Під час процесу друку FDM розплавлений матеріал наноситься на платформу шар за шаром для створення 3D-об'єктів. В якості матеріалу для друку FDM широко використовуються різні термопластичні матеріали, такі як акрилонітрил-бутадієн-стирол (ABS), полімолочна кислота (PLA), ударостійкий полістирол (HIPS), полікарбонат (ПК), нейлон, полівініловий спирт (PVA), поліетилентерефталат (ПЕТ). Високоєфективні термопласти, такі як поліестер-естеркетон (PEEK) та поліетиримід (PEI), мають видатні механічні властивості та стійкість до високих температур. Ці матеріали необхідні для застосувань, де потрібні довговічність, хімічна стійкість і термостійкість, таких як аерокосмічна, автомобільна та медична промисловість [3].

Титановий сплав є одним з найбільш часто вивчених матеріалів АМ. Ці сплави відрізняються високим співвідношенням міцності до ваги, хорошою тріщиностійкістю і втомною міцністю, хорошою корозійною стійкістю і здатністю до формування і т. д. він володіє відмінними властивостями з точки зору, що, в свою чергу, дозволяє їм широко використовуватися в аерокосмічній, автомобільній і біомедичній областях. Основною причиною його широкого використання є його сумісність з низкою біомедичних застосувань.

Металокераміка – це комбінація металевої та керамічної фаз, яка забезпечує одночасно властивості як кераміки, так і металу, кераміка в основному знаходиться у фазі затвердіння, а метали-у фазі зв'язування. Вольфрам, титан, оксиди танталу, карбіди, нітриди і карбонітри, молібден, нікелевий сплав і т. д. вони часто використовуються як металеві стяжки [2].

FDM працює шляхом видавлювання термопластичної нитки через нагріту насадку і нанесення матеріалу шар за шаром, щоб сформувати об'єкт. Технологічний прогрес у стереолітографії (SLA) спрямований на те, щоб зробити можливим виготовлення деталей з високою деталізацією та гладкими поверхнями за рахунок збільшення швидкості та роздільної здатності процесу друку. Технологія цифрової оптичної обробки (DLP), подібна до SLA, використовує цифрові оптичні проектори для затвердіння світлочутливих смол. Він характеризується високою швидкістю друку і здатністю виготовляти деталі з мінімальною деталізацією. Досягнення технології DLP включають розробку нових сумішей смол, що покращують механічні та термічні властивості друкованої продукції, які можна використовувати в більш складних додатках. Селективне лазерне спікання (SLS) та пряме лазерне спікання (DMLS) - це методи плавлення порошкового шару, які використовують лазер для спікання порошкоподібних матеріалів та їх з'єднання для утворення міцних структур [6].

Декомутація 3D-моделі в файл стереолітографії (STL) є важливим кроком у розвитку 3D-друку і служить сполучною ланкою між цифровим дизайном і фізичним додатком. Цей процес перетворює 3D-дизайн у формат, який 3d-принтер може інтерпретувати та використовувати для створення об'єктів шар за шаром. Формат STL спрощує модель, розбиваючи поверхню на ряд трикутників, також відомих як тесселяція. Кожен трикутник визначається координатами датчика, що складається з 44 вершин, і напрямком його нормалі (зовнішній вектор, перпендикулярний поверхні трикутника). Це спрощення є важливим, оскільки воно перетворює складні геометричні фігури в єдину трикутну мову, зрозумілу 3D-принтеру. Файли STL містять багато важливих функцій, таких як роздільна здатність та агрегатор. Якість файлу STL залежить від розміру трикутника. Чим менший розмір трикутника, тим вища роздільна здатність, і ви можете отримати більш детальний друк, але за рахунок збільшення розміру файлу. Крім того, модель STL також повинна бути "водонепроникною". Тобто потрібно переконатися, що немає прогалів або отворів і що всі нормалі спрямовані назовні. Моделі без колектора можуть викликати помилки друку. Після експорту в файл STL відбувається процес нарізки, при якому спеціалізоване програмне забезпечення перетворює

файл STL в G-код. Перед нарізкою користувачі можуть налаштувати орієнтацію, масштаб та інші параметри моделі для оптимізації друку [5].

Новий підхід був застосований до порожнистих високопродуктивних деталей роботів, які на 54,3 % легше в порівнянні з поліпшеними алюмінієвими деталями роботів [7]. Однак адитивне виробництво з автоматичною збіркою компонентів і матеріалів, які важко або неможливо виготовити в польових умовах, дозволяє обробляти інтегральні схеми, батареї і компоненти прецизійного обладнання на місці [8]. Мобільність роботів дозволяє використовувати адитивні технології в місцях, небезпечних або важкодоступних для людини [2].

Більшість процесів АМ засновані на механізмі зв'язування синтезу рідини. У цьому механізмі в полімерах відбувається текучість з низькою в'язкістю, в той час як в металах відбувається плавлення. Наступний шар з'єднується з попереднім шаром під час потоку з низькою в'язкістю після нанесення. Механізм склеювання листів на основі термоядерного синтезу включає часткове і повне плавлення під час склеювання і в основному застосовується до металів і полімерів SLS. Метал частково розплавлений, а в разі часткового плавлення він існує у вигляді суміші твердих металів разом з розплавленим металом між твердими шарами / частинками дека. З іншого боку, він містить повністю щільні деталі в стані повного плавлення, що виключає необхідність герметизації після обробки. Отже, термоядерне з'єднання відповідає за виготовлення щільних металевих деталей, отриманих методами DED і PBF.

Незважаючи на значний прогрес, досягнутий за дуже короткий проміжок часу, існують деякі проблеми в поточному процесі адитивних технологій. Звичайна установка адитивної технології формує деталі в основному з плоского листа. Використання плоских шарів для наближення до сильно вигнутої геометрії вимагає великої кількості шарів. Це призводить до тривалого терміну виробництва. Укладання рівного листа для створення деталі може призвести до небажаних анізотропних властивостей матеріалу. Це може зменшити міцність деталі. Наближення плоского шару також може спричинити ефект проростання та призвести до поганої обробки поверхні. Для поліпшення поверхні потрібна значна постобробка. Деякі типи деталей не можуть бути виготовлені за існуючою технологією плоского шару АМ через обмеження роздільної здатності / точності. Такі деталі повинні бути виготовлені заздалегідь і інтегровані в продукт. Крім АМ, більшість машин, доступних в даний час на ринку, накладають великі обмеження на розмір деталей, обмежуючи розмір деталей, які можуть бути виготовлені за допомогою АМ.

Важливою проблемою є швидкість друку, яка незважаючи на вдосконалення, залишається низькою для масового виробництва та обмежує її використання. Фінансові обмеження також є серйозною перешкодою. Асортимент матеріалів, придатних для 3D-друку, розширюється, але різноманітність і характеристики матеріалів, що використовуються в традиційних виробничих процесах, як і раніше відсутні.

Розвиток технології 3D-друку обіцяє підвищити швидкість друку, різноманітність матеріалів та економічну ефективність.

Складна геометрія та внутрішня гратчаста структура деталей АМ створюють проблеми з механічною придатністю. Широкі вимоги та стандарти якості ускладнюють розробку стратегій забезпечення якості. Дефекти деталей АМ (пористість, тріщини, включення, порожнечі, комковатість та шорсткість поверхні) можуть негативно вплинути на механічні властивості, що є необхідним для подальшого дослідження та удосконалення [4].

Майбутнє АМ пов'язане з розвитком у кількох аспектах, таких як розробка нових матеріалів, технологічні інновації та інтеграція технологій АМ у традиційні виробничі лінії. Значні дослідження зосереджені на масштабованій технології АМ для великих конструкцій, біодруку для медичних застосувань та інтеграції штучного інтелекту для оптимізації процесів друку та властивостей матеріалів.

Current state of additive technologies for manufacturing parts and components of robotics

S.G. Katrich, D.O. Dmitriev

Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine

Abstract. Approaches to classifying parts according to the method of additive technologies used are analyzed. The list and brief description of thermoplastic materials are given. It is said that thanks to additive manufacturing, objects of almost any shape can be created without the use of tools. Complex objects can be made in one stage of the process, which reduces production time. Existing methods for creating 3D models are considered. It is shown that 4D AM is a process that involves printing from materials that can transform over time, or from of special system of materials that can change the form using four sizes, and the printed structure is no longer static. The classification of AM on the principle of production, lists the disadvantages of additive technologies and the methods of their elimination, the need for additional mechanical processing are indicated.

Keywords: 3D printing, thermoplastic materials; ceramet; FDM; SLS, ASTM-F42 Committee, Robotics.

Список літератури

1. Ключников Ю. В., Дубнюк В. Л., Сердігов О. Т., Полешко О. П. Сучасний стан застосування адитивних технологій у літако- та ракетобудуванні. *Матеріали XXIII МНТК "Прогресивна —техніка, технологія та інженерна освіта"*. КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна. 2023. С. 138-141. doi: 10.20535/2409-7160.2023.XXIII.278122.
2. Струтинський В., Гуржій А. Елементи теорії проектування маніпуляторів із композитних матеріалів для наземних роботизованих комплексів спеціального призначення. *Матеріали науково-технічної конференції "Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта"*, (XXIII), 2023. С. 171–173. <https://doi.org/10.20535/2409-7160.2023.XXIII.281397>.
3. Саленко О., Орел В., Габузьян Г., Костенко А., Цуркан Д. Вплив температури екструдованого філаменту на параметри міцності тонкостінних виробів. *Матеріали науково-технічної конференції "Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта"*, (XXIII), 2023. С. 185–189. <https://doi.org/10.20535/2409-7160.2023.XXIII.278904>.
4. Цибуленко В., Воронцов Б. Забезпечення контролю якості для традиційного і адитивного виробництва. *Матеріали науково-технічної конференції "Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта"*, (XXIII), 2023. С. 192–195. <https://doi.org/10.20535/2409-7160.2023.XXIII.278009>.
5. Shahrubudin, N., Lee, T.C., Ramlan, R. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. *Procedia Manufacturing*. Elsevier BV; (2019); 35:1286-1296, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>.
6. Tikhomirov, E.; Åhlén, M.; Di Gallo, N.; Strømme, M.; Kipping, T.; Quodbach, J.; Lindh, J. Selective laser sintering additive manufacturing of dosage forms: Effect of powder formulation and process parameters on the physical properties of printed tablets. *Int. J. Pharm.* 2023, 635, 122780.
7. Quanjin, Ma, Rejab, M.R.M., Idris, M.S., Kumar, Nallapaneni Manoj, Abdullah, M.H., Reddy, Guduru Ramakrishna. Recent 3D and 4D intelligent printing technologies: A comparative review and future perspective. *Procedia Computer Science*. Elsevier BV; 2020; 167:1210-1219, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.434>.
8. Zhou, L.; Miller, J.; Vezza, J.; Mayster, M.; Raffay, M.; Justice, Q.; Al Tamimi, Z.; Hansotte, G.; Additive Manufacturing: A Comprehensive Review, *Sensors* 2024, 24(9), 2668; <https://doi.org/10.3390/s24092668>.