

УДК [67.02+66-9]:62-12

Перспективи і проблеми створення гідравлічного привода за допомогою адитивних технологій

Єременко Р.О., Бадах В.М.

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

***Анотація:** В даній роботі проведено аналіз можливості застосування різних методів адитивних технологій для виробництва лінійних гідравлічних приводів для різних цілей: моделювання в рамках проектування, моделювання у процесі навчання і підготовки спеціалістів галузі а також створення повноцінних агрегатів, здатних конкурувати з існуючими аналогами. Аналізуючи проведені дослідження можна визначити велику кількість потенційних напрямків для подальших досліджень, що зумовлено відносною новизною адитивних технологій у процесі виготовлення силових приводів, і пов'язаних із цим труднощів. Існуючі адитивні технології і засоби виробництва надають широкий вибір технічних рішень, котрі різняться за доступністю, точністю і відносною безпекою експлуатації, що значно розширює можливості їх застосування як у виробництві так і у навчанні і підготовці спеціалістів галузі.*

***Ключові слова:** гідравлічний привод; адитивні технології; 3Д друк; FDM; SLS; SLA*

Гідравлічний привод (ГП) являє собою пристрій призначенням якого є передача, керування та розподілення енергії від джерела до споживача через робочу рідину, з лінійним або обертальним рухом вихідної ланки. Гідравлічний привод займає важливе місце у широкому колі галузей промисловості через ряд унікальних властивостей і характеристик (у порівнянні з електричним та пневматичним приводами), таких як: висока питома потужність, висока надійність і зрілість технології, високі динамічні характеристики, широкий діапазон швидкостей і зусиль що розвиваються приводом, тощо. Особливо незамінними вони є там, де виникає необхідність переміщувати ланки агрегатів зі значним зусиллям та високою точністю (машинобудування, аерокосмічна галузь, важка техніка).

Традиційно, якщо розглядати галузь літакобудування, то на гідравлічний привод покладена важлива роль у керуванні літальним апаратом, через що до ГП пред'являються жорсткі вимоги щодо його надійності, безвідмовності, енергоефективності і економічності. Лінійний ГП є ключовим елементом системи керування положенням у просторі літака, приводить в дію секції елеронів, руля напрямку, руля висоти та інтерцепторів. Окрім цього лінійний ГП також застосовується для приведення в дію механізмів прибирання-випуску та керування шасі літака. Із вищевказаного виходить, що кількість таких приводів на сучасних літаках є значною, і питання покращення економічності, технологічності і зменшення ваги завжди є актуальними.

Розвиток електричних систем, комп'ютерних технологій і алгоритмів, необхідність у більш екологічних машинах, змушують до пошуку і розробки нових рішень у літакобудуванні [1]. Дана тенденція також мотивує покращення систем ГП на літальних апаратах. З одного боку, збільшення ступеня електрифікації літаків, прагнення до здешевлення і прискорення технічного обслуговування, покращення екологічності та безпеки, направляють розвиток систем ГП в сторону гібридизації з електричними системами та децентралізації, що можна простежити у значній кількості наукових публікацій за останні декілька років. З іншого боку також можна спостерігати початок розвитку напрямків досліджень, покликаних оптимізувати сам ГП з точки зору технології його виготовлення, що наразі стає можливим завдяки адитивним технологіям (АТ), також відомим як "3Д-друк", і доступному програмному забезпеченню, які відкривають нові можливості у проектуванні та виробництві об'єктів довільної складності з мінімальними затратами.

Аналізуючи джерела на предмет використання АТ для виготовлення приводів загалом, слід відзначити, що в основному цей підхід активно досліджується для виготовлення

пневматичних та гідравлічних приводів з гнучкою структурою (soft robotics, flexible actuators), які працюють під низьким робочим тиском, і основним призначенням яких є робототехніка та біоінженерія. Як приклад, можна навести джерело [2] в якому представлені основні переваги такого методу виготовлення, котрий дозволяє накладати як тверді так і рідкі шари речовини в процесі друку, виключає значну кількість етапів збирання об'єкта і дозволяє отримати геометрію довільної складності. Також слід відзначити те, що методи АТ дозволяють виробляти мініатюрні агрегати, що робить їх надзвичайно актуальними для вищезазначених цілей.

Виготовлення габаритних гідравлічних та пневматичних лінійних приводів (циліндрів) та їх елементів для роботи з високими робочими тисками все ще викликає певні труднощі. Нижче наводиться узагальнений перелік результатів досліджень щодо таких приводів і елементів їх систем.

Дослідженню процесів виготовлення силового циліндра та елементів привода із пластику методом наплавлення матеріалу (Fused Deposition Modeling, FDM) [3] присвячені дослідження [4–8]. В основному, предметами даних досліджень є мініатюрні моделі приводів, з робочим тиском до 5 МПа, на яких досліджувався вплив обраного матеріалу, напрямку друку, статичні та циклічні навантаження і можливості обробки внутрішньої поверхні агрегата для покращення його характеристик.

Так, автори [5] відзначають основними перевагами АТ із застосуванням пластику можливість вбудовувати датчики і сенсори в конструктивні елементи пневматичного циліндра, і як приклад наводять виготовлений зразок із сенсором магнітного поля для визначення переміщення штока, і сенсорами тиску для непрямого визначення зусилля, котрі інтегровано в конструкцію.

У дослідженні [6] наводиться приклад застосування човникового клапана, виготовленого за допомогою АТ для мініатюрного електрогідروпривода з робочим тиском 4.5 МПа, із подальшим аналізом його динамічних характеристик. Автори відзначають задовільний рівень динамічних характеристик, при надзвичайно малих затратах на виготовлення агрегата.

У дослідженні [7] авторами робиться акцент на недоліках АТ методом наплавлення. Зокрема, дослідні зразки, при недостатній товщині стінки циліндра руйнувались під час хімічної обробки поверхні ацетоном (для покращення шорсткості поверхні та ізоляції пор у матеріалі). Також відзначається понижена міцність циліндра у тому випадку, коли він друкується у вертикальному напрямку, тобто, коли шари матеріалу накладаються кільцями. Це пов'язано із пониженою адгезією між попереднім та новим шаром матеріалу. Наявність пор у матеріалі призводила до втрат робочого тіла, що разом із погіршеннями виготовлення вимагали додаткової обробки внутрішньої поверхні циліндра. Використання того чи іншого матеріалу також впливає на можливість обробки поверхні різними засобами.

Загалом, перевагами виготовлення ГП методом наплавлення (FDM) є:

1. Дешевизна і доступність обладнання і матеріалів. Побутові FDM 3Д принтери є доступними і простими в роботі.

2. Відносна безпечність і зручність у експлуатації дозволяє працювати з цією технологією не тільки на виробництві, але і в умовах навчальних лабораторій і навіть вдома. Так, наприклад, джерела [4, 8] є прикладами студентських магістерських робіт.

Відповідно, недоліками є:

1. Обмеження за матеріалами. Побутові FDM принтери, зазвичай, використовують у якості робочого тіла різноманітні пластики, що не є бажаним матеріалом для виготовлення ГП високого тиску. Також слід урахувати взаємодію конструктивного матеріалу з робочою рідиною ГП.

2. Обмежена точність побутових принтерів, що впливає на якість поверхонь.

3. Необхідність проектувати геометрію з додатковими технологічними елементами для забезпечення підтримки конструкції під час виготовлення.

4. Анізотропія міцнісних характеристик, зумовлена специфікою процесу нашарування матеріалу у вертикальному напрямку. Це зумовлює необхідність виготовлення циліндра під кутом для покращення міцності і якості поверхні [4].

Значна кількість недоліків не дозволяє визнати метод із застосуванням сучасних побутових FDM принтерів доречним для розробки повноцінних габаритних ГП, проте не слід виключати, що були розглянуті не всі можливі перспективні напрямки застосування саме цього методу.

Як аналогію методу FDM можна також розглядати метод стереолітографії (Stereolithography, SLA) [3], який може задовольнити вимоги щодо якості поверхні, але може бути більш дорогим і менш технологічно зручним у порівнянні з FDM [9].

Найбільш досконалим і найбільш близьким до виготовлення ГП індустріального рівня є метод селективного лазерного спікання (Selective Laser Sintering, SLS) [3]. Саме цей метод АТ дозволяє використовувати порошкову металеву сировину для виготовлення високоточних і надійних об'єктів, але, відповідно, за більшу ціну і з більш складним технологічним процесом. Обладнання для виготовлення деталей даним методом знаходиться у цій категорії порядку 10000 — 100000 доларів США [10].

Автори дослідження [11] відзначають можливість створення геометрично складних конструктивних елементів з інтегрованими елементами ГП, проте даний підхід вимагає ретельного контролю дефектів, які можуть утворитись у виробі внаслідок недотримання технологічних процедур та невдалого проектування геометричних параметрів моделі. Також відзначається, що проведення технічного контролю і обслуговування готового виробу в таких випадках може бути дуже складним або неможливим. Дослідження дефектів структури у даному дослідженні відбувалось за допомогою методу комп'ютерної томографії (CT X-ray scanning).

Дослідження [12] напряму стосується створення авіаційного електрогідролічного привода, і є ключовим серед усього проаналізованого на даний момент матеріалу. За допомогою методу SLS було виготовлено авіаційний ГП із порошкової марагенової сталі. Авторами дослідження були проведені досліди зі статичної та втомної міцності надрукованих зразків, і відзначається, що статична міцність відповідає аналогічним зразкам, котрі виготовляються традиційно, а втомна міцність дослідних зразків менша лише на 16%. Виготовлений ГП являє собою завершений агрегат, який було протестовано під тиском 10 МПа. Заявлені вагові характеристики майже вдвічі перевершують аналогічні ГП виготовлені стандартними методами. Більш того відзначається можливість тісної інтеграції елементів у агрегаті, що відкриває нові шляхи до оптимізації характеристик привода.

Враховуючи результати недавніх досліджень, можна відзначити, що метод FDM є більш доцільним для створення мініатюрних моделей ГП, що працюють за невеликих робочих тисків, хоча можна вказати і на те, що перспективним є дослідження виготовлення габаритних моделей із додатковим армуванням, або виготовлення гібридних агрегатів з метою зменшення впливу недоліків даного методу і матеріалів, які застосовуються.

Найбільш доцільним застосуванням в даному випадку можна відзначити можливість безпечного і доступного використання даного методу у навчальному процесі. Це є актуальним з огляду на стрімкий розвиток АТ, а також дозволить інтегрувати теоретичні та практичні елементи дисциплін з інженерного 3Д моделювання для закріплення вмінь та здобуття досвіду студентами.

Як альтернативу методу FDM пропонується розглядати метод SLA, проте наразі не було знайдено даних щодо спроб виготовлення гідролічних або пневматичних лінійних приводів за допомогою стереолітографії.

Найбільш досконалим є метод SLS, котрий дозволяє виготовляти об'єкти з достатньою міцністю та якістю поверхні, проте наразі даний метод є відносно дорогим і має підвищені вимоги щодо дотримання технології процесу і техніки безпеки.

Також слід відзначити загальносуспільні тренди щодо впровадження так званих "відкритих технологій", що, наразі, стосується не лише програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом, але і відкритого апаратного забезпечення [13], невід'ємною частиною якого є АТ. Долучення до таких ініціатив може позитивно відобразитись на майбутньому як вітчизняної так і світової інженерії та науки.

Список літератури

1. FlightPath 2050 Goals | Acare: URL: <https://www.acare4europe.org/sria/flightpath-2050-goals> (дата звернення: 15.08.21).
2. MacCurdy, R., Katzschmann, R., Kim, Y., та ін. Printable hydraulics: A method for fabricating robots by 3D co-printing solids and liquids: 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May.16. С. 3878–3885.
3. Адитивні технології: URL: https://uk.wikipedia.org/w/index.php?title=%D0%90%D0%B4%D0%B8%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D1%96_%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%96%D1%97&oldid=32710468 Вікіпедія, (дата звернення: 15.08.21).
4. Tiel Groenestege, J. 3D Printed Hydraulic Actuation: Design and Evaluation of a 3D Printed Hydraulic Actuation System. 2021.
5. Krause, J., Bhounsule, P. A 3D Printed Linear Pneumatic Actuator for Position, Force and Impedance Control. Actuators. 2018. Vol. 7, No. 2. С. 24.
6. Wiens, T., Deibert, B. A Low-Cost Miniature Electrohydrostatic Actuator System. Actuators. 2020. Vol. 9, No. 4. С. 130.
7. Nall, C. L., Bhounsule, P. A. A Miniature 3D Printed On-Off Linear Pneumatic Actuator and Its Demonstration into a Cartoon Character of a Hopping Lamp. Actuators. 2019. Vol. 8, No. 4. С. 72.
8. Martinez De Apellaniz Goenaga, I. Development of a 3D printed hydraulic piston-cylinder system. 2019.
9. Kostuchenko, I., Nochnichenko, I. On the issue of creating pneumatic systems using adaptive 3D printing technologies and their potential: До питання про створення пневматичних систем із використанням адаптивних технологій 3D-друку та їх потенціал. Інновації молоді в машинобудуванні. 2021. No. 3. С. 248–252.
10. Desktop SLS 3D printer 2021: hardware selection and technology guide: URL: <https://www.aniwaa.com/buyers-guide/3d-printers/best-professional-desktop-sls-3d-printers/> Aniwaa, (дата звернення: 16.08.21).
11. Geating, J. T., Wiese, M. C., Osborn, M. F. Design, fabrication, and qualification of a 3D printed metal quadruped body: combination hydraulic manifold, structure and mechanical interface: Solid Freeform Fabrication 2017: Proceedings of the 28th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium—An Additive Manufacturing Conference, 17.
12. Warzocha, K., Szura, J., Bąk, P., та ін. Transformative Use of Additive Technology in Design and Manufacture of Hydraulic Actuator for Fly-by-Wire System. Applied Sciences. 2021. Vol. 11, No. 11. С. 4772.
13. Open-source hardware: URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Open-source_hardware&oldid=1038207588 Wikipedia, (дата звернення: 15.08.21).
14. 07588 Wikipedia, (дата звернення: 15.08.21).

Possibilities and problems of additive technologies in manufacturing of hydraulic actuator

Yeremenko Roman, Badakh Valerii

Abstract. *In this paper prospects of application of additive technologies is considered in regards to manufacturing of hydraulic actuator in different scenarios: modeling as a part of development, modeling in studying, and manufacturing of industrial-grade hydraulic actuator completely by means of additive technologies. After analyzing prior researches it can be concluded that there are numerous potential possibilities in future research of this subject due to many complications of additive technologies application for the purpose of manufacturing of hydraulic actuator. Present-day additive technologies provide a wide range of means for different cost, precision and safety of operation, which makes it possible to implement them in both industry and education.*

Keywords: *hydraulic actuator; additive technologies; 3D printing; FDM; SLS; SLA*