УДК 621.74.045: 621.452: 355.4

**О. Б. Янченко, В. С. Дорошенко, О. О. Збожинська**

# ПЕРСПЕКТИВИ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА МАЛОГАБАРИТНИХ РЕАКТИВНИХ ДВИГУНІВ (ДОСВІД КОМПАНІЇ BEEHIVE INDUSTRIES, США)

***Анотація.*** *На прикладі досвіду компанії Beehive Industries (США) розглянуто перспективи впровадження 3D-друку металів для створення малогабаритних реактивних двигунів. Обґрунтовано необхідність розвитку адитивного виробництва в Україні задля подолання дефіциту ливарних потужностей та забезпечення потреб оборонно-промислового комплексу.*

***Ключові слова****: адитивне виробництво, реактивні двигуни, Beehive Industries, безпілотні апарати, безпекові виклики.*

***Abstract****. The prospects of implementing metal 3D printing for small-scale jet engines based on the experience of Beehive Industries (USA) are examined. The necessity of developing additive manufacturing in Ukraine to overcome foundry shortages and meet defense industry needs is substantiated.*

***Keywords****: additive manufacturing, jet engines, Beehive Industries, unmanned vehicles, security challenges.*

**Вступ**. Сучасний стан бойових дій в Україні вимагає масового випуску асиметричних засобів – ударних дронів та ракетної зброї. Ключовою перепоною на цьому шляху є дефіцит масового виробництва силових установок – малогабаритних турбореактивних двигунів тягою 0,44…2,22 кН. Традиційне двигунобудування базується на литті металу за моделями, що виплавляються, штампуванні та складній токарно-фрезерній обробці. Ці процеси вимагають виготовлення тривалого інструментального оснащення (прес-форм, штампів), залежать від обмеженої кількості ливарних потужностей та формують довгий і вразливий ланцюг постачання.

**Аналіз досвіду компанії Beehive Industries (США).** Передові оборонні розробники США вирішують цю проблему через перехід на адитивне виробництво – селективне лазерне сплавлення (LPBF). Застосування 3D-друку забезпечує радикальне скорочення кількості деталей шляхом їх конструктивної консолідації. Наприклад, для двигуна класу тяги 2,22 кН традиційна конструкція містить понад 2000 деталей, тоді як варіант від Beehive Industries – лише 140 компонентів, з яких основну частину становлять 14 надрукованих металевих елементів. Зразки таких виробів наведено на рис. 1 (двигун у зборі ліворуч та окремі друковані деталі праворуч). Для меншого 7-дюймового двигуна (тяга 0,89 кН) основу конструкції утворюють лише 5 друкованих деталей. Відсутність потреби у ливарному оснащенні дозволила скоротити шлях від креслень до вогневих випробувань демонстратора тягою 2,22 кН до 13…16 місяців. Консолідація деталей знижує собівартість двигуна майже вдвічі (з $70 тис. до $35 тис.), а складні геометричні форми підвищують паливну ефективність на 20%.

Поряд з турбореактивними двигунами малої потужності з тягою до 1,47 кН (150 кгс) та експлуатаційним ресурсом близько 50…100 годин за кордоном активного розвитку набуває створення турбовальних двигунів із друкованими деталями на базі турбореактивного двигуна. У такій силовій установці енергія продуктів згоряння палива перетворюється на крутний момент на вивідному валу, з якого корисна потужність передається на повітряний гвинт, електрогенератор чи інші механізми. На місце реактивного сопла в таких конструкціях встановлюють вузол вільної турбіни, яка, на відміну від звичайної, не пов'язана жорстко з компресором, тому може обертатися в широкому діапазоні частот. Доопрацювання ведеться з урахуванням збільшення ресурсу до 3000 годин, при цьому розрахункова потужність модернізованої силової установки становить від 270 до 300 кВт із можливістю короткочасного підвищення до 350 кВт.

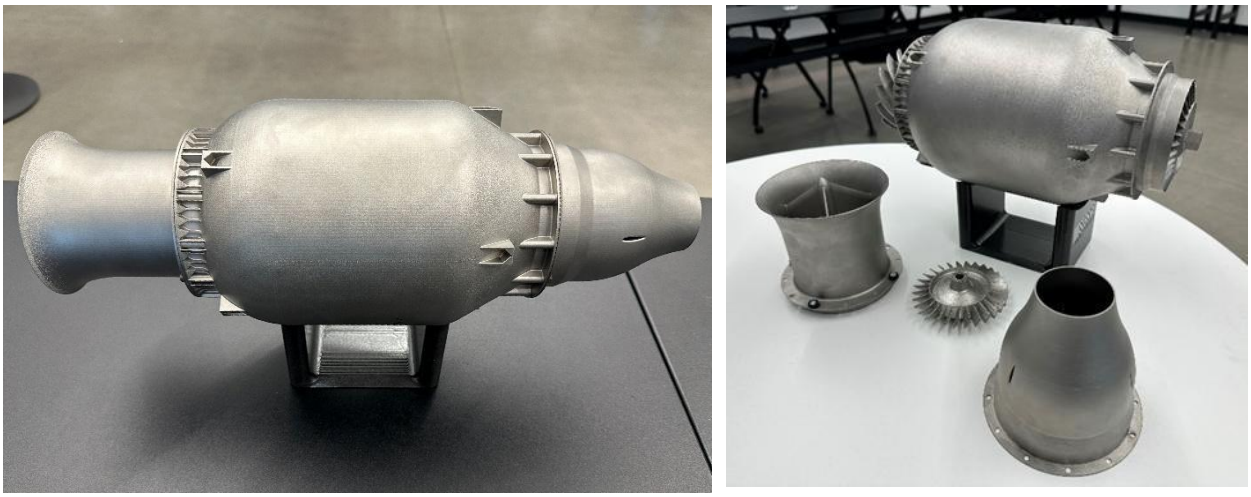

Рис. 1. Малогабаритний двигун із 3D-друкованих компонентів компанії Beehive Industries: двигун у зборі (ліворуч) та приклади окремих друкованих деталей (праворуч) [1]

Такий турбовальний двигун може стати надійним джерелом механічної енергії для генераторів, які виробляють електрику для бортових систем управління. Впровадження цієї установки дозволить суттєво зменшити масу літального апарату за рахунок скорочення вагових параметрів акумуляторних батарей. Заощаджене корисне навантаження можна використовувати для встановлення додаткової апаратури або збільшення запасу палива, що дасть змогу літальним апаратам довше перебувати в повітрі та долати більші відстані.

Для забезпечення стійкості виробничих процесів впроваджуються компактні «модулі» (дільниці 3D-друку, механічної вирізки та фінішної обробки на верстатах з ЧПК), які можна масштабувати або дублювати в різних регіонах, що мінімізує ризики знищення централізованих підприємств у разі ракетних ударів.

**Перспективи застосування в Україні**. Для України досвід передових розробок ОПК США є критично важливим. Незважаючи на постійні ракетні та дронові обстріли, вітчизняні науково-дослідні установи, зокрема Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, володіють вагомим потенціалом у галузі матеріалознавства, ливарних та адитивних технологій.

Основними кроками для освоєння вітчизняного адитивного вирощування малогабаритних двигунів має стати об'єднання зусиль інститутів НАН України, ДП «Івченко-Прогрес», АТ «Мотор Січ» та приватних виробників БПЛА для розробки уніфікованої лінійки 3D-друкованих силових установок. Необхідно запровадити адитивне вирощування деталей із жароміцних нікелевих, титанових та алюмінієвих сплавів для компенсації відсутності складних ливарних форм, а також здійснити перехід до концепції розподіленого цифрового виробництва, що дозволить організувати випуск реактивних двигунів на гнучких модульних майданчиках.

**Висновки**. Реагуючи на безпекові виклики сьогодення, Україна повинна переходити від рольової моделі «мішені для реактивних БПЛА» до активного виробника власної високоточної зброї. Досвід компанії Beehive Industries доводить, що застосування адитивного виробництва дозволяє в стислі терміни організувати серійний випуск малогабаритних реактивних двигунів із меншою собівартістю та високою паливною ефективністю, оминаючи традиційне вузьке місце — дефіцитні ливарні потужності.

Список використаних джерел:


1. Hendrixson S. Beehive Industries Is Going Big on Small-Scale Engines Made Through Additive Manufacturing [Електронний ресурс] / S. Hendrixson // Additive Manufacturing Media. – 2024. – доступу: https://www.additivemanufacturing.media/articles/beehive-industries-is-going-big-on-small-scale-engines-made-through-additive-manufacturing (дата звернення: 17.10.2024).
2. Kremenetsky M. US Air Force Awards Beehive Industries $12.4M to 3D Print Engines for Unmanned Vehicles [Електронний ресурс] / M. Kremenetsky // 3DPrint.com. – 2024. – Режим доступу: https://3dprint.com/314095/us-air-force-awards-beehive-industries-12-4m-to-3d-print-engines-for-unmanned-vehicles (дата звернення: 31.10.2024).

***Янченко Олександр Борисович*** *– кандидат технічних наук, доцент кафедри військової підготовки Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, буд. 95, інд. 21021, e-mail: 1961yab@gmail.com,*

*ORCID https://orcid.org/0000-0002-3888-3772*

***Дорошенко Володимир Степанович*** *– доктор технічних наук, провідний науковий співробітник відділу фізико-хімії ливарних процесів Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України, м. Київ, вул. Акад. Вернадського, буд. 34/1, інд. 03142, e-mail: doro55v@gmail.com, ORCID https://orcid.org/0000-0002-0070-5663*

***Збожинська Ольга Олександрівна –*** *студент групи 02-25 (ВОС 121100) кафедри військової підготовки Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, буд. 95, інд. 21021.*

***Oleksandr Borysovych Yanchenko*** *– PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Military Training, Vinnytsia National Technical University 95Khmelnytske Shosse, Vinnytsia, 21000, Ukraine, e-mail: 1961yab@gmail.com, ORCID https://orcid.org/0000-0002-3888*

***Volodymyr Stepanovych Doroshenko*** *– Doctor of Sciences (Engineering), Lead Researcher, Department of Physical Chemistry of Casting Processes, Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine, 34/1 Acad. Vernadsky Ave., Kyiv, 03142, e-mail: doro55v@gmail.com, ORCID https://orcid.org/0000-0002-0070-5663*

***Olha Oleksandrivna Zbozhynska*** *– student of group 02-25 (VOS 121100) of the military training department of Vinnytsia National Technical University, 95Khmelnytske Shosse, Vinnytsia, 21000, Ukraine*