

В. В. Бачинський, О. М. Шкурпіт

ПІДБІР МАТЕРІАЛУ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ЗА АДИТИВНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ

Аддитивні технології дозволили сформувавши принципово новий напрямок у виробництві безпілотних літальних апаратів, за допомогою якого можна виготовляти одиничні й унікальні зразки виробів за рахунок поступового нарощення матеріалу методом пошарового синтезу з одночасним одержанням заданої форми та розмірів виробу на основі цифрового прототипу. Сучасні можливості обладнання і матеріалів швидко еволюціонують у бік більшого розміру продукції, вищої точності та якості, великих швидкостей друку виробу й низьких витрат. У разі використання традиційних способів виробництва вартість і складність безпілотних літальних апаратів досить висока. Застосування аддитивних технологій дозволяє істотно знизити вагу корпусу безпілотників за рахунок скорочення витрат матеріалу.

У статті проведено дослідження властивостей різних полімерів, які застосовуються в адитивному виробництві, визначено їх вплив на якість елементів безпілотного літального апарата, а також започатковано розроблення методики підбору матеріалів для виготовлення його комплектуючих деталей.

Проведені дослідження порушили цілу низку проблемних питань, пов'язаних із необхідністю вдосконалення процесу 3D-друку, організації та управління виготовленням складних елементів безпілотних літальних апаратів, які б дозволили ефективно використовувати новітні адитивні технології 3D-друку в сучасному виробництві в бойових умовах.

За результатами дослідження визначено властивості основних матеріалів для 3D-друку, які використовуються у FDM-технології отримання виробу. Встановлено, що застосування адитивних технологій спричинить коригування принципів конструювання безпілотних літальних апаратів, відпрацювання технологій друку, використання нових стратегій побудови, появу нових, суміжних із 3D-друком технологій. Аналіз механізмів управління якістю розробки деталей безпілотників свідчить, що технологічна схема підбору композиційного матеріалу є важливим елементом для 3D-друку сучасних апаратів та їх комплектуючих.

Передбачено, що з удосконаленням технологічного обладнання і розвитком методів підбору матеріалу для виготовлення елементів безпілотних літальних апаратів напрямок створення нових літальних апаратів за допомогою адитивних технологій буде неухильно розширюватися.

Ключові слова: адитивні технології; безпілотний літальний апарат; 3D-друк; полімер; структура.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Друк деталей на 3D-принтері дозволяє не лише друкувати безпосередньо самі безпілотні літальні апарати (БПЛА), а також створювати практично нескінченний резерв запасних елементів для них, що дає

© В. В. Бачинський, О. М. Шкурпіт, 2022

можливість збільшити ефективність тренування оператора та зменшити терміни ремонту регулярних поломок. Крім того, надрукований БпЛА буде простіше лагодити, що дозволить краще відчувати його внутрішню структуру і механіку. 3D-друк дозволяє також швидко розробляти деталі за власним проектом. Так, для відновлення приладів і деталей, наприклад відеокамер, різних датчиків, акумуляторних батарей, які потрібно встановити на БпЛА, адитивні технології дозволяють, використовуючи відповідне програмне забезпечення, роздруковувати будь-яку деталь і проводити її випробування, вносити будь-які зміни шляхом багаторазового друку.

Однак вагомим фактором, який найбільше впливає на властивості надрукованого виробу, звичайно ж, є марка і якість філаменту, особливо властивостей матеріалу в складних умовах експлуатації. Тому, виходячи з викладеного вище, можна стверджувати, що важливим завданням є вивчення алгоритму підбору матеріалу для виготовлення елементів БпЛА за адитивними технологіями.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У сучасних умовах ринок FDM-технологій активно розвивається, проводяться експерименти з друком різноманітними видами філаменту, інтенсивно вдосконалюється програмне забезпечення та процеси 3D-друку. Питанням вибору оптимального технологічного режиму та процесів усадки під час друку, використання різних додаткових елементів та модифікації полімерів дослідники приділяють значну увагу [1–5].

Можливості обладнання і матеріалів швидко еволюціонують у бік збільшення швидкості друку з більш високою якістю та точністю, а також зниженням витрат на виробництво [7–9]. Адитивні технології ідеально підходять для виготовлення, друку, ремонту та модифікації сучасних БпЛА в польових умовах. Це відбувається, тому що сучасний 3D-друк запропонував широку гаму матеріалів з різними властивостями: міцні, еластичні, термостійкі, надлегкі [10–15]. Однак аналіз механізмів управління якістю розробки елементів БпЛА, вибір композиційного матеріалу, процедури забезпечення якості адитивного виробництва їх комплектуючих до кінця ще не визначені.

Формулювання завдання дослідження. Метою статті є дослідження властивостей різних полімерів, які застосовуються в адитивному виробництві, їх впливу на якість елементів БпЛА, а також визначення порядку підбору матеріалів для виготовлення комплектуючих деталей для безпілотників.

Виклад основного матеріалу. Адитивне виробництво відіграє важливу роль в індустрії сучасних дронів, пропонуючи нові інноваційні можливості, що створює умови для покращення якості та зниження вартості виробів. Створення легких та надійних деталей стало необхідним для багатьох галузей. Збереження легкої структури допомагає покращити кінцевий продукт, оскільки оптимізація ваги – одна із найчастіших вимог для сучасних БпЛА. Легкі та надійні деталі також є великою перевагою для елементів безпілотників, адже вага має вирішальне значення для літального апарата. Адитивні технології дозволяють впроваджувати інновації щодо дизайну для всіх його частин, що є особливо важливим в умовах сучасної війни.

За результатами проведених досліджень встановлено, що застосування адитивних технологій у польових умовах сприятиме вирішенню таких завдань:

друк БпЛА в бойових умовах (дрони-камікадзе, розвідувальні, транспортні);

ремонт виробів (рама, гвинт, корпус, кронштейн для відеокамери тощо);
модернізація БпЛА (під конкретне завдання, дальність, час польоту);
обладнання новими технологіями (нічне бачення, система скидання, транспортний бокс);
друк допоміжних виробів (стабілізатори для пострілу осколкового гранатометного ВОГ-17, запірні механізми для ручних гранат, корпуси для вибухових речовин тощо).

При цьому БпЛА повинні бути досить легкими, а двигуни, у свою чергу, мають бути достатньо потужними, забезпечуючи виконання поставленого завдання. Тому основною метою виробництва безпілотників є створення легших і надійніших конструкцій. Легкі дрони легко виготовити за допомогою 3D-друку з використанням інноваційних технологій. Застосовуючи, наприклад, ґратчасті конструкції, можна значно зменшити вагу БпЛА. Однак важливим залишається підбір матеріалу та його вплив на якість елементів літального апарата.

Аддитивні технології широко застосовують у сучасній російсько-українській війні. Активно друкують як безпосередньо сам БпЛА (наприклад, «Бандерик»), так і різні додаткові елементи до нього (рис. 1).

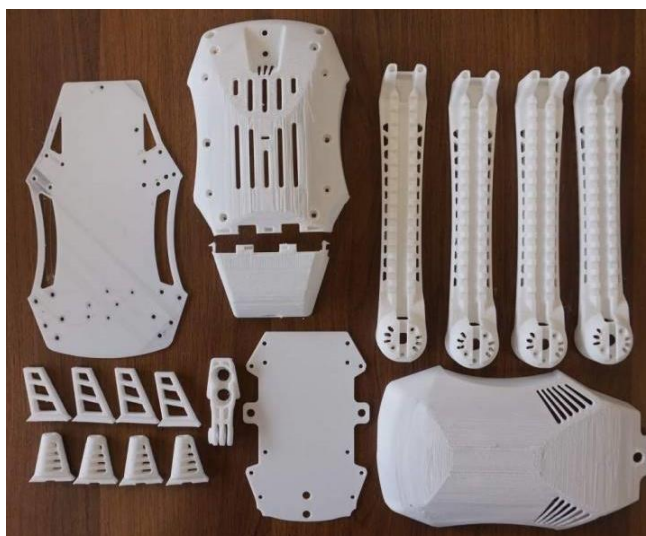


Рис. 1. Елементи БпЛА, надруковані на 3D-принтері

Отже, на 3D-принтері можна надрукувати як елементи дрона: каркас, підвіс камери, опорні конструкції, внутрішні корпуси, кріпильні кронштейни, електронні роз'єми, запасні частини, – так і додаткові елементи: стабілізатори для гранат (мін), систем скидання, запірних механізмів, корпуси для вибухових речовин тощо (рис. 2).



Рис. 2. Друк на 3D-принтері стабілізаторів для мін та різних корпусів

У технічних паспортах різних 3D-принтерів подають обмежений перелік їх характеристик, які можна порівнювати, але вони повною мірою не можуть описати якість виробів на виході.

Розробка порядку підбору композиційного матеріалу дозволяє вирішити суперечність визначення того матеріалу, який застосовують в адитивному виробництві, оскільки вибір філамента обмежується технічними характеристиками, зазначеними в паспортах пристроїв, вимогами до виробу та необхідною якістю отриманого елемента БпЛА.

Основні вимоги до вибору філамента для друку комплектуючих безпілотників повинні суворо дотримуватися. Міцність на вигин, міцність на розтягування, твердість полімерного матеріалу мають перевищувати або відповідати числу, вказаному в технічному завданні. Щільність, усадка, водопоглинання полімерного матеріалу не повинні перевищувати (або дорівнювати) відповідному показнику, зазначеному також у технічному завданні.

Нами було визначено шість груп якісних характеристик отриманого елемента для пошуку наближеного за сукупністю властивостей філамента відповідно до вимог технічного завдання (табл. 1, у якій V_v – це вимоги до виробу).

Таблиця 1

Фізико-механічні показники для вибору філамента

№	Показник	Розмірність	Виконання умови
1	Міцність на вигин (V_1)	МПа	$V_1 \geq V_v$
2	Міцність на розтягування (V_2)	МПа	$V_2 \geq V_v$
3	Щільність (V_3)	г/см ³	$V_3 \leq V_v$
4	Твердість за Роквелом (V_4)	Р-шкала	$V_4 \geq V_v$
5	Усадка (V_5)	%	$V_5 \leq V_v$
6	Вологопоглинання (V_6)	%	$V_6 \leq V_v$

Під час вибору філамента можливі два варіанти, розглянемо їх.

1. Один або кілька відповідних полімерів. Вибираємо кращий за сукупністю властивостей, виходячи із вимог до виробу.

2. Немає відповідного полімеру. Якщо не дотримуються умови технічного завдання щодо виконання всіх шести вимог, то друк виробу не можливий. У разі виконання хоча б трьох вимог допускається використання полімерного матеріалу для друку виробу, але за дотримання таких обов'язкових двох умов: $V_3 \leq V_v$, $V_4 \geq V_v$.

Для виявлення найбільш важливих показників якості елементів БпЛА, виконаних за адитивними технологіями, розроблено процедуру структурування функцій якості. З метою її реалізації виявлено вимоги та якісні характеристики, які в подальшому зіставлені для знаходження зв'язку між ними у матриці сумісності вимог (табл. 2).

Таблиця 2

Матриця сумісності «вимоги – якісні характеристики» БпЛА

Вимоги	Якісні характеристики					
	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6
Удароміцність	++	++	+	+++	-	-
Складність деталі	-	-	-	-	++	-
Герметичність	-	-	+	-	-	+
Маса деталі	-	-	+++		+	+
Гладкість поверхні	-	-	-	-	++	-
УФ захист	-	-	-	+	-	-
Швидкість друку	-	-	+	-	+	-

На рис. 3 наведено технологічну схему вибору філаменту для БПЛА.

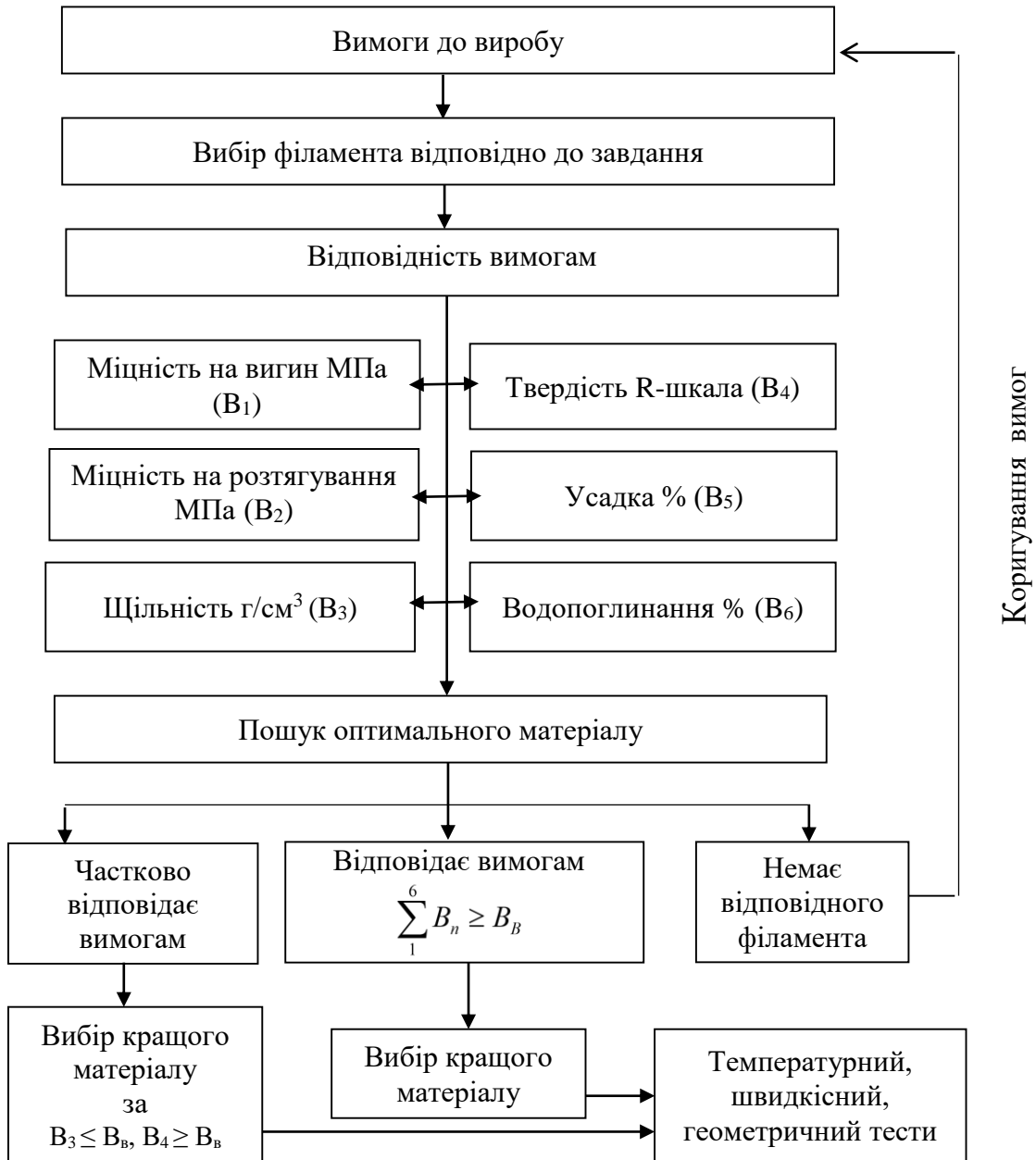


Рис. 3. Технологічна схема вибору матеріалу для БПЛА

Для вибору пластику (філаменту), який найбільш повно задовольняє вимоги до БПЛА, нами було проаналізовано найпоширеніші на території України його види, що мають різні фізико-механічні характеристики. Кожен із досліджених матеріалів вирізняється низкою переваг та недоліків. Для найбільш доцільного вибору філаменту, що відповідає певним технологічним характеристикам, було розроблено спеціальну порівняльну таблицю (табл. 3).

Аналіз отриманих результатів показує, що абсолютно ідеального матеріалу для 3D-друку немає, оскільки кожен має як негативні, так і позитивні характеристики та властивості, тому вибір залежатиме передусім від призначення виробу та умов його експлуатації.

Порівняльна таблиця технічних характеристик пластику за вимогами до виробу

Тип пластику	ABS	PLA	PETG	Nylon	HIPS
Межа міцності та вигин, МПа	41	55,3	76,1	70	37,6
Межа міцності на розрив, МПа	22	57,8	36,5	66-83	16,4
Усадка, %	0,8	0	0	1,2	0,4
Щільність, г/см ³	1,1	1,25	1,3	1,13	1,05
Твердість за Роквелом	105-110	70-90	106	-	79
Вологопоглинання, %	0,2-0,45	0,2-0,4	0,12	3,1	1

Проаналізувавши дані зведеної таблиці технічних характеристик пластику, можна зробити висновок, що найбільш придатними і технологічно вигідними матеріалами для елементів БпЛА є HIPS, ABS і PETG. Основними характеристиками, які зумовлюють вибір, є: щільність, твердість і вологопоглинання. Вони впливають на такі найважливіші параметри, як: маса літального апарата, герметичність і вологостійкість його корпусу.

Також визначено, що для виготовлення основних елементів БпЛА можна застосовувати HIPS-пластик, оскільки за своїми характеристиками він має найменшу щільність (1,05) за нульового відсотка вологопоглинання. Застосовуючи цей філамент, можна досягти найвигідніших показників маси літального апарата, а також вологопоглинання. У той же час пластик ABS надасть максимальної твердості виробу.

Матеріал PETG також має майже нульовий відсоток вологопоглинання, але для нього характерна найбільша щільність, що може призвести до небажаного обтяження апарата, незважаючи на це, даний вид філаменту відмінно підходить для виготовлення гнучких, сполучних механізмів безпілота.

На цьому етапі проводиться підбір філаменту, що відповідає технічному завданню. Після вибору типу пластику необхідно провести тести, оскільки філамент одного виду, одного й того самого виробника, але різних кольорів або партій за фізико-механічними властивостями може суттєво відрізнятись. Ми рекомендуємо провести такі тести: температурна вежа, тест відкатів, тест герметичності друку.

Висновки. Сьогодні вже цілком очевидно, що освоєння адитивних технологій зумовлює коригування принципів конструювання БпЛА, відпрацювання технологій друку, використання нових стратегій побудови, появу нових, суміжних з 3D-друком технологій. Тому аналіз механізмів управління якістю розробки елементів безпілота свідчить, що технологічна схема підбору композиційного матеріалу є важливим елементом для 3D-друку сучасних БпЛА та їх комплектуючих. Перспективою подальших досліджень є розроблення методики підбору матеріалу для виготовлення деталей безпілота за адитивними технологіями.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ

1. 3D printing community: MakerBot's Thingiverse. URL: <https://www.thingiverse.com/> (last accessed: 20.06.2022).
2. Учебный центр ведущих мировых производителей 3D-принтеров. URL: <https://blog.iqb.ru/additive-technologies-in-production/> (дата обращения: 01.06.2022).

3. Relativity Space, Inc.: the world's first autonomous rocket factory and launch services leader for satellite constellations. URL: <https://www.relativityspace.com/stargate/> (last accessed: 20.06.2022).
4. Green Car Congress Magazine: Energy, technologies, issues and policies for sustainable mobility. URL: <http://www.greencarcongress.com/2012/08/sulsa-20120827.html> (last accessed: 20.06.2022).
5. 3D PRINTING & ADDITIVE MANUFACTURING INTELLIGENCE: TCT Magazine. URL: www.tctmagazine.com/additive-manufacturing/university-of-sheffieldtrials-3d-printed-unmanned-aircraft/) (last accessed: 20.06.2022).
6. Обеспечение качества аддитивного производства посредством системы контроля послойного синтеза / А. В. Чабаненко, Е. Г. Семенова, В. О. Смирнова, А. О. Смирнов, Н. Н. Рожков // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 10. С. 75–79.
7. Spoerk M., Holzer C., Gonzalez-Gutierrez J. Material extrusion-based additive manufacturing of polypropylene: A review on how to improve dimensional inaccuracy and warpage // Journal of Applied Polymer Science. 2019. Vol. 137, Iss. 12. P. 48545. <https://doi.org/10.1002/app.48545>
8. Кондрашов С. В., Пыхтин А. А., Ларионов С. А., Сорокин А. Е. Влияние технологических режимов FDM-печати и состава используемых материалов на физико-механические характеристики FDM-моделей (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 10 (82). С. 34–49. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-10-34-49>
9. Савицкий Н. В., Шатов С. В., Ожищенко О. А. 3D-печать строительных объектов // Вестник Приднепровской гос. академии строительства и архитектуры. 2016. № 3 (216). С. 18–26.
10. Bos F. et al. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing // Virtual and Physical Prototyping. 2016. Vol. 11, Iss. 3. P. 209–225. <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>
11. Biranchi Panda, Suvash Chandra Paul, Ming Jen Tan. Anisotropic mechanical performance of 3Dprinted fiber reinforced sustainable construction material // Materials Letters. 2017. Vol. 209. P. 146–149. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.07.123>
12. Kablov E. N. New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2020. Vol. 90, No. 2. P. 225–228. <https://doi.org/10.1134/s1019331620020124>
13. Zhang X., Fan W., Liu T. Fused deposition modeling 3D printing of polyamide-based composites and its application // Composites Communications. 2020. Vol. 21. P. 100413. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100413>
14. Investigation of processing parameters on tensile performance for FDM-printed carbon fiber reinforced polyamide 6 composites / Peng X., Zhang M., Guo Z. et al. // Composites Communication. 2020. Vol. 22. P. 100478. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100478>
15. Designing 3D printable polypropylene: Material and process optimization through reology / Bertolino M., Battegazzore D., Arrigo R. et al. // Additive Manufacturing. 2021. Vol. 40. P. 101944. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101944>

Стаття надійшла до редакції 06.07.2022.

REFERENCES

1. *3D printing community: MakerBots Thingiverse.* (n.d.). Retrieved from <https://www.thingiverse.com/>
2. *Uchebnyi tsentr vedushchikh mirovykh proizvoditelei 3D-printerov [Training center for the world's leading manufacturers of 3D printers].* (n.d.). Retrieved from <https://blog.iqb.ru/additive-technologies-in-production/> [in Russian].
3. *Relativity Space, Inc.: the world's first autonomous rocket factory and launch services leader for satellite constellations.* (n.d.). Retrieved from <https://www.relativityspace.com/stargate/>
4. *Green Car Congress Magazine: Energy, technologies, issues and policies for sustainable mobility.* (n.d.). Retrieved from <http://www.greencarcongress.com/2012/08/sulsa-20120827.html>
5. *3d Printing & Additive Manufacturing Intelligence: TCT Magazine.* (n.d.). Retrieved from www.tctmagazine.com/additive-manufacturing/university-of-sheffieldtrials-3d-printed-unmanned-aircraft/
6. Chabanenko, A. V., Semenova, E. G., Smirnova, V. O., Smirnov, A. O., Rozhkov, N. N. (2018). Obespechenie kachestva additivnogo proizvodstva posredstvom sistemy kontrolya posloinogo sinteza [Assuring the quality of additive manufacturing through a layered synthesis control system]. *Voprosy radioelektroniki [Questions of radio electronics]*, 10, 75–79 [in Russian].
7. Spoerk, M., Holzer, C., & Gonzalez-Gutierrez, J. (2019). Material extrusion-based additive manufacturing of polypropylene: A review on how to improve dimensional inaccuracy and warpage. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 137, Iss. 12. P. 48545. <https://doi.org/10.1002/app.48545>
8. Kondrashov, S. V., Pykhtin, A. A., Larionov, S. A., & Sorokin, A. E. (2019). Vliianie tekhnologicheskikh rezhimov FDM-pechati i sostava ispol'zuemykh materialov na fiziko-mekhanicheskie kharakteristiki FDM-modelei (obzor) [Influence of technological modes of FDM printing and the composition of materials used on the physical and mechanical characteristics of FDM models (review)]. *Trudy VIAM [Proceedings of VIAM]*, 10 (82), 34–49. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-10-34-49> [in Russian].
9. Savitskii, N. V., Shatov, S. V., & Ozhishchenko, O. A. (2016). 3D-pechat' stroitel'nykh ob"ektov [3D-printing of building objects]. *Vestnik Pridneprovskoi gos. akademii stroitel'stva i arkhitektury [Bulletin of the Pridneprovsk State University. academy of construction and architecture]*, 3 (216), 18–26 [in Russian].
10. Bos F. et al. (2016). Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 11, Iss. 3, 209–225. <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>
11. Biranchi Panda, Suvash Chandra Paul, & Ming Jen Tan. (2017). Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material. *Materials Letters*, Vol. 209, 146–149. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.07.123>
12. Kablov E. N. (2020). New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, Vol. 90, No. 2, 225–228. <https://doi.org/10.1134/s1019331620020124>
13. Zhang, X., Fan, W., & Liu, T. (2020). Fused deposition modeling 3D printing of polyamide-based composites and its application. *Composites Communications*, 21, 100413. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100413>

14. Peng, X., Zhang, M., & Guo, Z. et al. (2020). Investigation of processing parameters on tensile performance for FDM-printed carbon fiber reinforced polyamide 6 composites. *Composites Communication*, Vol. 22, 100478. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100478>
15. Bertolino, M., Battezzore, D., & Arrigo, R. et al. (2021). Designing 3D printable polypropylene: Material and process optimization through reology. *Additive Manufacturing*, 40, 101944. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101944>

V. V. Bachynskiy, O. M. Shkurpit

MATERIAL SELECTION FOR MANUFACTURING UAV ELEMENTS USING ADDITIVE TECHNOLOGIES

Additive technologies have made it possible to form a fundamentally new direction in the technology of unmanned aerial vehicles production, with the help of which it is possible to manufacture single and unique samples of products due to the layer-by-layer build-up of material by the method of layer-by-layer synthesis with the simultaneous obtaining of the given shape and dimensions of the next product based on a digital prototype. Modern capabilities of equipment and materials are rapidly evolving towards larger product sizes, higher accuracy and quality, high product printing speeds and low costs. When using traditional methods of production, the cost and complexity of unmanned aerial vehicles is quite high. The use of additive technologies allows you to significantly reduce the weight of the UAV body due to the reduction of material consumption.

The article investigates the properties of various polymers used in additive manufacturing, determines their impact on the quality of unmanned aerial vehicles elements, and also develops a methodology for selecting materials for the manufacture of unmanned aerial vehicles elements.

The conducted research revealed a whole layer of issues and problems related to the need to improve the 3D printing process, organization and management of the printing of complex elements of the air defense system, which would allow effective use of the latest additive 3D printing technologies in modern production in combat conditions.

According to the results of the research, the properties of the main materials for 3D printing, which are used in the FDM technology of obtaining the product, have been established. It has been established that the use of additive technologies will entail the adjustment of unmanned aerial vehicles design principles, the development of printing technologies, the use of new construction strategies, and the emergence of new technologies related to 3D printing. The analysis of quality control mechanisms for the development of unmanned aerial vehicles elements shows that the technological scheme for the selection of composite material is an important element in the 3D printing of modern unmanned aerial vehicles and their components.

It was determined that with the improvement of technological equipment and the development of methods of material selection for the manufacture of unmanned aerial vehicles elements, the direction of creating new unmanned aerial vehicles with the help of additive technologies will steadily expand.

Keywords: *additive technologies; unmanned aerial vehicles; 3D printing; polymer; structure.*