

времени вычислений. Например, при $N = 4$ время вычислений достигает нескольких часов, при этом качество решения остается недостаточным [5]. Эти результаты были получены с использованием программы MATLAB.

В заключение, следует отметить, что текущий контроллер РМПУ еще не обеспечивает стабилизацию квадрокоптера на заданной траектории. Однако в будущем дрон сможет точно следовать заданной траектории благодаря методу проб и ошибок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Akinola Alexander Dada, “Modelling, Simulation, and Implementation of Linear Control for Asymmetric Multirotor UAV,” Ph.D. dissertation, the university of Sheffield, Sheffield, pp.11- 29, 2020,
2. Kostas A., Papachristos C., Slegwart R., Tzes A. Robust model predictive flight control of unmanned rotorcrafts // Journal of Intelligent Robotic Systems, 81(3), pp. 443-469, 2016,
3. Loeffberg, J., “Minimax approaches to robust model predictive control,” Ph.D. dissertation, Linkoping University, Linkoping, Sweden, 2003,
4. Degtyarev G. L., Faizutdinov R. N., Spiridonov I. O. Multiobjective Robust Controller Synthesis for Nonlinear Mechanical System, Мехатроника, Автоматизация, Управление, 2018, vol. 19, no. 11, pp. 691–698. DOI: 10.17587/mau.19.691-698,
5. Хафизов А.И. Робастное модельное прогнозирующее управление движением квадрокоптера: магистерская диссертация, КНИТУ-КАИ, Казань, 2021.

УДК 678.7.095.26:773.92:528.837

ФОТОПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В.Б. ХОДЕР, Е.И. КОРДИКОВА, М.А. ЛУКША

Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

Современное общество использует беспилотные летательные аппараты (БПЛА) в военной сфере, медицине, логистике (доставка и определение маршрута), при аварийно-спасательных работах, строительстве и

архитектуре, кинопроизводстве и средствах массовой информации (СМИ), сельском хозяйстве и других областях. Применение в различных отраслях требует гибких подходов в производстве, использующих обширный спектр материалов.

Основными критериями оценки используемых при производстве узлов БПЛА технологий и материалов выступают требования жесткости, упругости, прочности, плотности, технологичности, в том числе затраты на изготовление [1]. Данные критерии определяют эффективность производства, точность и безошибочность полета, грузоподъемность, невидимость, маневренность и прочие условные характеристики БПЛА.

При проектировании элементов БПЛА применяют два основных подхода: с уклоном на прочность и долговечность или быструю заменяемость и легкость конструкции. При этом производства БПЛА является мелкосерийным с высокой степенью индивидуализации под запросы потенциальных потребителей с возможностью изменения отдельных конструкторских или дизайнерских решений для улучшения технических характеристик. Классические технологии с применением композиционных материалов являются основой прочности и долговечности конструкции, обуславливают высокую стоимость при штучном производстве БПЛА.

Аддитивные технологии являются высокоэффективным методом изготовления изделий различного назначения и позволяет снизить затраты при производстве БПЛА и применять оба подхода проектирования в зависимости от требований к функциональности готового летательного аппарата. Подвижность методов с возможностью изменения формы и размеров элементов конструкции на любом этапе производства, расширение вариативности форм и структуры отдельных частей БПЛА позволяет обходить множество ограничений и создавать оптимальные и эффективные конструкции для каждой из представленных задач.

Аддитивные технологии позволяют производить конечные детали без оснастки, что присуще традиционным технологиям, благодаря чему скорость производства и рентабельность продукции повышается.

В производстве БПЛА хотя и имеется опыт практического применения аддитивных технологий, но эффективное использование методов крайне ограничено. Основной проблемой большинства методов аддитивного синтеза является слоистость структуры, которая под воздействием потоков воздуха, нагрузок и постоянных колебаний приводит к расслаиванию и последующему нарушению стабильности и прочности БПЛА.

Технологии фотополимеризации в ванне позволяют получить изделия с возможностью реализации практически изотропных структур, из-за особенности прохождения процессов отверждения. Взаимное

проникновение и образование связей между макромолекулами в слоях в процессе печати и постобработки в УФ лучах позволяют достигнуть повышения свойств до 40% по сравнению с «зеленой» деталью. Возможности дополнительной термообработки для некоторых фотополимеризующихся составов также позволяют изменить упруго-прочностные характеристики.

При этом послойная фотополимеризация позволяет получить сложные формы без значительного применения поддерживающих структур, которые могут оказывать влияние на обтекаемость элементов БПЛА.

Методы фотополимеризации в ванне позволяют получить более сложные формы с полой или ячеистой структурой, топологически оптимизированной для получения наименьшего веса, правильного распределения колебаний, уравниваемости конструкции во всех направлениях и минимизации повреждений внутренних комплектующих, за счет поглощения ударной энергии.

В качестве материалов для фотополимерной печати могут применяться стандартные смолы со средними показателями прочности и ударопрочности. Перспективным направлением является использование наполненных систем, как уже имеющихся на рынке в подразделе инженерных смол, так и разрабатываемых с применением различных видов твердых наполнителей [2].

Анализ имеющихся на рынке и возможных к применению в производстве элементов БПЛА инженерных материалов представлен в таблице 1. При этом в качестве оценочного параметра использовался критерий производительности $K_{\text{сум}}$, определяемый как суммарный весовой коэффициент критериев (от 1 до 5 баллов) [1]:

$K_1 = E^{1/2} / \rho$ – максимальная жесткость при минимальном весе;

$K_2 = \sigma^{2/3} / \rho$ – максимальная прочность при минимальном весе;

$K_3 = KC / \rho$ – максимальная ударная прочность при минимальном весе (повышение усталостной долговечности).

Исходя из представленного анализа материалов, наиболее эффективным с точки зрения показателей прочности является материал HARZ Labs Industrial Rigid Black. Однако при производстве в качестве дополнительного критерия оценки следует учитывать стоимость конечного изделия и весовой коэффициент критериев, которые зависят от назначения и требований проектируемому БПЛА.

Одним из примеров печати элементов дрона методом проекционной масочной стереолитографии (DLP) является производство дрона Fvр Freestyle командой Craft Chanel, корпус которого напечатал из фотополимерной смолы UltraCraft Reflex PAU10.

Табл.1. Инженерные материалы для трехмерной печати элементов БПЛА методами фотополимеризации в ванне

| Материал | Стоимость, дол. США./кг | Критерии производительности | | | |
|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------|-------|------------------|
| | | K_1 | K_2 | K_3 | $K_{\text{сум}}$ |
| UltraPrint-Performance PAR30 | 100 | 1 | 1 | 5 | 7 |
| Ultracur3D® RG 35 | 140 | 3 | 4 | 2 | 8 |
| HARZ Labs Industrial Rigid Black | 130 | 2 | 5 | 2 | 9 |
| Creality Standard Rigid | 40 | 1 | 3 | 1 | 5 |
| Accura Xtreme White 200 | 340 | 3 | 2 | 4 | 8 |
| Shenzhen Kings KS908C | 320 | 3 | 1 | 4 | 8 |
| WeNext CV-UV 9400 | 270 | 3 | 1 | 4 | 8 |
| Formlabs Rigid 10K Resin | 230 | 5 | 1 | 1 | 7 |
| Black ABS-like Resin TOP31B | 90 | 3 | 2 | 2 | 7 |
| Somos Taurus | 240 | 2 | 1 | 3 | 6 |
| YG H-3001 | 280 | 3 | 2 | 2 | 8 |

SLA-печать также уже достаточно долго применяется в области прототипирования и разработки функциональных элементов. Инжиниринговая компания Marble использовала фотополимерную смолу Formlabs Grey V2 для прототипирования макета и печати съемных элементов при разработке дрона-квадрокоптера Marble MRB-1 [3]. При разработке беспилотного летательного аппарата Zelator для печати корпуса использовалась наполненная смола, которая позволила ему выдерживать суровые условия окружающей среды при транспортировке грузов на далекие расстояния [4].

Генераторный квадрокоптер-дрон спасатель X VEIN благодаря трехмерной печати оптимизирован для оказания помощи при стихийных бедствиях, имеет усиленную раму и защитные кожухи для пропеллеров. Применение трехмерной печати при его производстве позволило использовать сложные геометрические формы и достичь высоких скоростей с оптимизированными параметрами прочности и веса [5].

Кроме того, исследование с печатью новой разработанной лопасти со сложной геометрией методом фотополимеризации в ванне инженерам компании Formlabs позволила снизить производимый шум и повысить скорость вращения [6].

Проведенный анализ информационных источников по теме позволяет сделать вывод о возможности и целесообразности применения аддитивных технологий методом фотополимеризации в ванне в производстве БПЛА. Трехмерная печать помогает рядовым пользователям,

тестировщикам, гонщикам и другим специалистам различной направленности оптимизировать процесс проектирования, обучения специалистов, быстрого ремонта и восстановления элементов БПЛА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Altaie A.I., Doos Q.M. Material Selection for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) Wings Using Ashby Indices Integrated with Grey Relation Analysis Approach Based on Weighted Entropy for Ranking // Journal of Engineering. 2023. Iss. 7. Vol. 29. P. 189–200.

2. Ходер В. Б., Кордикова Е. И., Дьякова Г. Н. Наполненные фотополимерные композиции для 3D-печати методом стереолитографии (обзор) // Труды БГТУ: Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2022. № 1 (253). С.27–32.

3. 3D Printed Drones Take to the Skies// Formlabs. URL: <https://formlabs.com/> (date of access: 26.03.2024).

4. Domestic 3D printed UAV has been declared the best cargo drone of the future. URL: <https://3d-expo.ru/> (date of access: 26.03.2024).

5. Japanese makers generatively design and 3D print X VEIN drone for disaster response. URL: <https://www.voxelmatters.com/> (date of access: 26.03.2024).

6. 3D Printed Drone Toroidal Propellers vs Regular Propellers. URL: <https://formlabs.com/> (date of access: 26.03.2024).

УДК 004.415.25

БЕСПИЛОТНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ АППАРАТЫ В АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВ

В.Н. ШУТЬ, И.С. ТУЗ, А.А. СИДОРЕНКО

Брестский государственный технический университет
Брест, Беларусь

Роботы – это физические агенты, которые выполняют поставленные перед ними задачи, проводя манипуляции в физическом мире. На данный момент все большую перспективность приобретает мобильная робототехника – область робототехники, где роботы автономны и способны самостоятельно выполнять широкий спектр различных задач. Существует большое количество подходов к управлению роботами и