

Учреждение образования
«Белорусский государственный технологический университет»



«БПЛА – 2025»

Сборник статей II Международного форума по беспилотным аппаратам

Минск, 30 сентября – 02 октября 2025

В 2-х частях
Часть 2



Минск 2025

УДК 005.745:629.735.33.052-52
ББК 39.52я43

Беспилотные аппараты «БПЛА – 2025» : сб. ст. II Междунар. форума по беспилотным аппаратам, Минск, 30 сентября – 2 октября 2025 г. / Белорус. гос. технол. ун-т ; отв. за изд. И. В. Войтов. – Минск : БГТУ, 2025 : в 2 ч. – 157 с. – Ч. 2. ISBN 978-985-897-300-1.

В издании представлены научные статьи, освещающие вопросы применения в различных сферах экономики беспилотных летательных аппаратов, создания систем их управления, особенностей конструирования БПЛА и материалов для их производства.

Адресовано практикам, преподавателям, научным работникам, аспирантам, студентам I и II ступени получения высшего образования, интересующимся современным состоянием и перспективами развития общества, науки и экономики.

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

ВОЙТОВ Игорь Витальевич, ректор Белорусского государственного технологического университета, доктор технических наук, профессор
(председатель);

ФЛЕЙШЕР Вячеслав Леонидович, проректор по научной работе Белорусского государственного технологического университета,
доктор технических наук, доцент;

КАЛИНИЧЕНКО Александр Сергеевич, директор центра «Научно-технологический парк БГТУ» Белорусского государственного технологического университета, доктор технических наук

ГУНДИЛОВИЧ Николай Николаевич, директор Института повышения квалификации и переподготовки кадров БГТУ, кандидат технических наук;

КУИС Дмитрий Валерьевич, заведующий кафедрой материаловедения и проектирования технических систем, кандидат технических наук, доцент

ISBN 978-985-897-300-1 (Ч. 2) © УО «Белорусский государственный
ISBN 978-985-897-299-8 технологический университет», 2025

III СЕКЦИЯ

**ПОЛИМЕРНЫЕ, КОМПОЗИЦИОННЫЕ,
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ И СИЛИКАТНЫЕ
МАТЕРИАЛЫ И ИХ ТЕХНОЛОГИИ
ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ СИСТЕМ.
ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ
И АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

УДК 674.055.621

**СПЕЦИФИКА ОБРАБОТКИ СОВРЕМЕННЫХ
КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ
АППАРАТОВ НА СТАНКАХ С ЧПУ**

А.Ф. АНИКЕЕНКО, Г.В. АЛИФИРОВЕЦ

Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

Аннотация. В статье анализируются ключевые технологические проблемы, препятствующие эффективной обработке полимерных композиционных материалов (ПКМ) на адаптированном парке дерево- и металлообрабатывающих станков с ЧПУ. На примере характерных дефектов доказывается необходимость перехода от методов адаптации к разработке специализированных решений в области оборудования, инструмента и технологических процессов. Предложены перспективные направления для развития отечественной производственной базы в области изготовления высокоточных компонентов БПЛА.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, обработка резанием, износ инструмента, расслоение, беспилотные летательные аппараты, технологическая адаптация.

Введение. Широкое внедрение полимерных композиционных материалов (ПКМ) стало ключевым фактором в создании современных высокоэффективных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Уникальное соотношение прочности и жесткости к массе делает угле- и

стеклопластики идеальными конструкционными материалами для планеров, силовых элементов и обшивки [1]. Однако производство деталей из ПКМ сопряжено с фундаментальными технологическими вызовами, которые часто недооцениваются.

Отсутствие на большинстве предприятий специализированного оборудования вынуждает технологов адаптировать под эти задачи традиционный парк дерево- (ДОС) и металлообрабатывающих станков (МОС) с ЧПУ [2]. Данный подход, являясь временным компромиссом, порождает комплекс взаимосвязанных проблем, которые не только снижают экономическую эффективность, но и напрямую влияют на качество и надежность конечной продукции. Целью данной работы является анализ этих проблем и обоснование необходимости перехода от стратегии адаптации к созданию специализированных технологических решений.

Анализ ключевых проблем. Обработка ПКМ резанием принципиально отличается от обработки традиционных материалов. Анизотропия, абразивность и низкая теплопроводность композитов формируют три ключевые проблемы при использовании адаптированного оборудования.

1. Проблема стружкоотделения. Продуктом обработки является мелкодисперсная абразивная пыль, склонная к электростатизации [3]. Это приводит к:

- Быстрому абразивному износу направляющих и винтовых пар металлообрабатывающих станков
- Риску возгорания и взрыва при недостаточной эффективности аспирации
- Невозможности применения СОЖ, что исключает основную систему удаления отходов МОС

2. Проблема охлаждения. Невозможность применения жидкостного охлаждения из-за гигроскопичности полимерных материалов приводит к:

- Концентрации тепла в зоне резания (до 80% тепла передается инструменту)
- Термической деградации материала (обугливание материалов, расслоение)
- Ускоренному диффузионному износу твердосплавного инструмента

3. Проблема инструмента. Абразивное действие армирующих волокон требует:

- Использования дорогостоящего алмазного инструмента (PCD) вместо стандартного

- Специальной геометрии режущей части для эффективного удаления пыли

- Частой замены инструмента даже при использовании твердых сплавов с износостойкими покрытиями

Абразивный характер износа приводит к формированию ярко выраженной площадки износа по задней поверхности, что вызывает:

- Рост усилий резания и вибраций
- Термические повреждения материала
- Дефекты обработки

Данный характер износа принципиально отличается от механизмов износа при обработке металлов и древесины.

Перспективные направления решения проблем

Преодоление указанных ограничений требует системного подхода:

1. Разработка специализированных станков-гибридов, сочетающих:

- Жесткость и точность металлообрабатывающих центров
- Мощные системы сухого пылеудаления с взрывозащитой
- Интегрированные системы подачи охлаждающего воздуха через шпиндель

2. Внедрение систем мониторинга в реальном времени:

- Контроль износа инструмента по косвенным признакам (потребляемая мощность, вибрация)
- Прецизионный контроль температурного режима

3. Развитие отечественного производства специализированного инструмента:

- Алмазный (PCD) инструмент с оптимизированной геометрией
- Износостойкие покрытия для твердых сплавов
- Использование «умного инструмента», позволяющего в процессе обработки менять геометрические параметры.

Заключение. Попытки адаптации традиционного оборудования для обработки ПКМ носят компромиссный характер и не позволяют обеспечить требуемые показатели точности, производительности и экономической эффективности. Дальнейшее развитие производства компонентов БПЛА требует перехода от стратегии адаптации к созданию специализированных технологических решений, включающих разработку нового оборудования, инструмента и систем контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sheikh-Ahmad, J.Y. Machining of polymer composites. Springer, 2009.
2. Hejjaji, A. et al. Machining of CFRP: A review // J. of Reinforced Plastics and Composites. 2018. Vol. 98. P. 557-582.

3. Wang, X. et al. Tool wear in drilling CFRP // J. of Manufacturing Processes. 2013. Vol. 15. P. 127-135.
4. Pereira, R.B. et al. MQL in drilling CFRP // The Int. J. of Advanced Manufacturing Technology. 2022. Vol. 118. P. 4123-4136.
5. Кочергин А.Н. Процессы резания и инструмент. М.: Инфра-Инженерия, 2020.

УДК 666.616; 552.11

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕЛОРУССКИХ БАЗАЛЬТОВ И ТУФОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО ВОЛОКНА

С.Е. БАРАНЦЕВА, Ю.А. КЛИМОШ, А.П. КРАВЧУК

Белорусский государственный технологический университет,
Минск, Беларусь

Базальтовое волокно – перспективный компонент композитных материалов в индустрии производства беспилотных аппаратов, обладающий высокими механическими свойствами, термической и химической стойкостью, экологичностью по сравнению со стекловолокном. Ежегодно в мире отмечается рост объемов выпуска и расширение области применения базальтового волокна, что делает перспективными проекты по развитию добычи и переработки базальтового сырья с целью реализации на внутреннем рынке и экспорта продукции в страны СНГ и Евросоюза.

Самыми крупными потребителями базальтов в РБ являются производители теплоизоляционных изделий на основе базальтового волокна. Белорусские производители волокнистых материалов до 2022 г. импортировали базальтовый щебень из Украины. С 2022 г. в связи с невозможностью импорта украинских базальтов предприятия переориентировались на российский рынок базальтового сырья. В настоящее время белорусскими производителями утеплителей на основе минерального волокна используется сырье, импортируемое из Российской Федерации. Существенное увеличение расстояния от карьера до потребителя сырья, а значит, транспортных расходов, привело к росту средней закупочной цены базальтового щебня почти в 2 раза. Произошедшие изменения обусловили целесообразность поиска альтернативных источников сырья.

В результате проведенных геологоразведочных работ в 2023 г. выполнена детальная разведка Новодворского месторождения базальтов и туфов, выявленного в Пинском районе. Уточнены глубины залегания и мощности пластов и выделенных слоев базальтовых и туфовых пород, обозначены границы распространения пород технологических типов сырья Т1, Т2, Т3.

Значительный объем работ по изучению указанных пород выполнен сотрудниками кафедры технологии стекла, керамики и вяжущих материалов БГТУ в тесном сотрудничестве со специалистами НПЦ по геологии. На основе исследований трех технологических проб базальтов и туфов на стадии предварительной разведки Новодворского месторождения установлено, что по своему химическому и минералогическому составу они являются перспективным сырьем (технологические типы сырья Т1+Т2) для производства волокнистых материалов.

В данной работе проведены экспериментальные исследования валовых проб базальтовых пород и сапонитсодержащих туфов, представляющих промышленный интерес для получения непрерывного и штапельного минерального волокна. Валовые пробы базальтов и сапонитсодержащих туфов представлены специалистами НПЦ по геологии.

На основе результатов многопозиционной термической обработки в интервале температур 20–1450 °С и дифференциальной сканирующей калориметрии базальтов, сапонитсодержащих туфов и комплексной пробы, состоящей из трех пород (базальты, глауконитсодержащие породы, сапонитсодержащие туфы) установлены температурные интервалы физико-химических процессов, происходящих при нагреве исследуемых проб: 50–200 °С – удаление адсорбционно связанной воды; 305–410 °С – образование гематита; 573 °С – полиморфное превращение кварца из β - в α -форму; 450–1000 °С – дегидратация глинистых минералов, диссоциация карбонатов магния и кальция; 1230–1400 °С – образование расплава. Согласно данным полученным в ходе термического анализа определено, что температурные интервалы плавления проб базальтов месторождения Новодворское близки к украинским базальтам.

Проверка пригодности расплавов на основе базальтов и шихт, включающих базальты и сапонитсодержащие туфы Новодворского месторождения, для получения непрерывного волокна проведена в экспериментальных условиях. Варка стекол на основе исследуемых проб осуществлялась в газовой печи при температуре 1450 ± 10 °С с выдержкой при максимальной температуре 1 ч. Получены образцы волокон различного диаметра, которые визуально аналогичны промышленным волокнам. Проведена комплексная оценка способности к волокнообразованию стеклорасплавов на основе исследуемых проб. Определены

следующие показатели: вязкость, краевой угол смачивания, температура верхнего предела кристаллизации, модуль кислотности стекол. В результате выявлено, что базальты Новодворского месторождения и большинство составов шихт, включающих базальт и сапонитсодержащие туфы, удовлетворяют требованиям ТУ ВУ 192018546.016–2017 «Сырье из горных пород для производства волокна базальтового» и могут быть рекомендованы для получения минерального волокна.

УДК 66.065

ВИХРЕВОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ СУСПЕНЗИЙ

А.М. ВОЛК

Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

Полимеры широко применяются в летательных аппаратах для снижения веса, защиты от коррозии, вибрации и других воздействий. Их применение приводит к экономии топлива, улучшению эксплуатационных характеристик и повышению эффективности летательного аппарата. Одним из самых популярных полимеров в мире является полиэтилен.

В процессе производства полиэтилена гранулы охлаждаются водой, затем отделяются от влаги и просушиваются в центрифугах. Центрифуги представляют собой дорогостоящие и энергоемкие устройства.

Наряду с центробежными устройствами для обезвоживания суспензий могут быть использованы и вихревые аппараты [1]. Вихревые аппараты характеризуются достаточной простотой конструкций, малой металлоемкостью, небольшим гидравлическим сопротивлением. Данные аппараты позволяют значительно интенсифицировать процесс межфазного массообмена, создать гидродинамические режимы с относительно высокими относительными скоростями частиц и несущей среды, значительными центробежными ускорениями.

В исследуемом аппарате (рис. 1) для разделения суспензии движущая сила процесса создается с помощью закрученного газового потока, образованного вращающимся устройством (вентиляторным колесом) [2].

При математическом моделировании исследуемых процессов рабочие камеры вихревых аппаратов рассматривались как вращающиеся осесимметричные цилиндры. Наружный цилиндр может быть пронизываемым [3].

На созданной экспериментальной установке (рис. 1), в которой соосно колесу установлен цилиндрический перфорированный элемент 2, помещенный в корпус 3 и снабженный патрубками 4 и 5 соответственно для ввода суспензии и вывода твердой фазы.

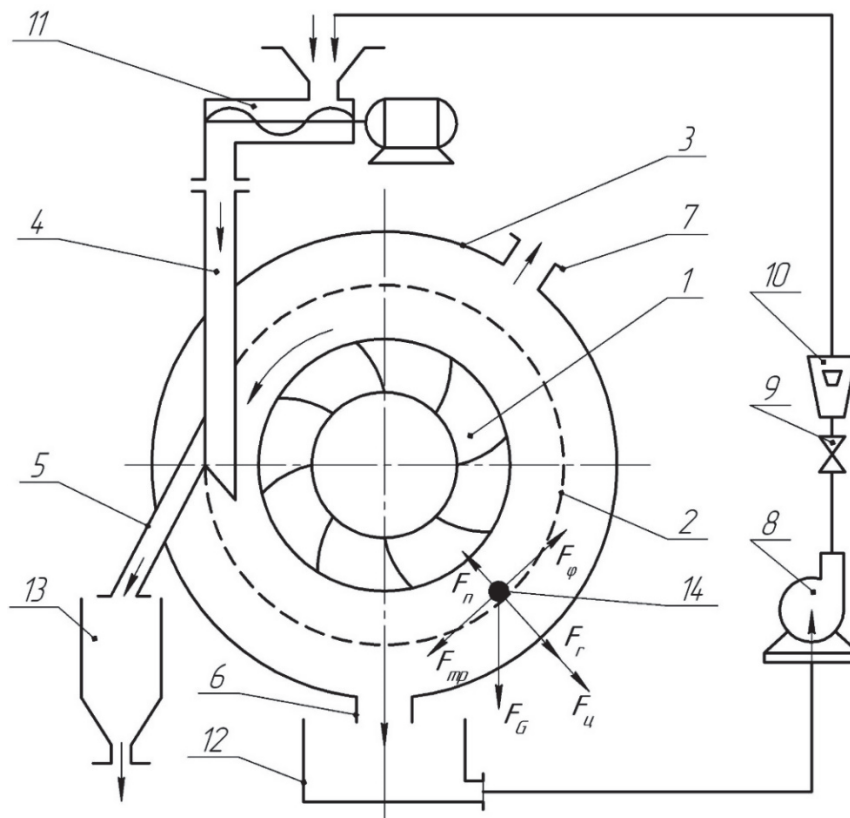


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – колесо; 2 – перфорированный элемент; 3 – корпус; 4 – патрубок для ввода суспензии; 5 – патрубок для вывода твердой фазы; 6 – патрубок для вывода жидкой фазы; 7 – патрубок для вывода газа; 8 – насос; 9 – вентиль; 10 – ротаметр; 11 – шнековый питатель; 12 – бак для сбора жидкости; 13 – бак для сбора твердой фазы; 14 – частица и действующие на нее силы

В целях использования всей поверхности перфорированного элемента ввод суспензии и вывод твердой фазы осуществлен в одном и том же месте. На части перфорированной поверхности происходило фильтрование суспензии, а на остальной поверхности – жидкой пленки с поверхности частиц. Жидкость постоянно стекала через патрубок 6. В патрубке 7 было предусмотрено устройство для регулировки отводимого газа. Жидкость подавалась насосом 8 через регулируемый вентиль 9 и ротаметр 10 для измерения ее расхода. Подача суспензии осуществлялась шнековым питателем. Были предусмотрены емкости 12 и 13 для сбора разделяемых жидкой и твердой фаз.

Для изучения процесса разделения использовали суспензии полимеров: полиэтилен – вода и полистирол – вода. Плотность полиэтилена составляла 930–970 кг/м³, полистирола – 1000–1050 кг/м³. Объемная концентрация твердой фазы в подаваемой на разделение суспензии изменялась в пределах 20–50 %. Гранулы имели сферическую форму диаметром 1–5 мм. Исследования проводились на цилиндрическом элементе радиусом $R = 0,22$ м, длиной $L = 0,04$ м, с относительной площадью отверстий $\bar{f} = 0,16$, сопротивлением $\zeta = 88,15$. Расход суспензии составлял 0,05–1 м³/ч.

Как показали результаты экспериментальных исследований и теоретические расчеты движения твердых частиц [4], жидкая фаза мало-концентрированных суспензий полиэтилена и полистирола отделялась на поверхности, не превышающей 1/5 части перфорированного элемента, в пределах изменения удельной нагрузки 6 – 100 м³/(м²·ч). На остальной поверхности происходил срыв жидкой пленки с поверхности частиц. Устойчивая транспортировка и высокая производительность по твердой фазе были обеспечены при достаточно малой средней скорости газа. В исследуемых режимах работы аппарата частота вращения колеса вентилятора изменялась до 2300 об/мин, что обеспечивало среднюю касательную скорость газового потока в пределах до 8 м/с. Увеличение скорости газового потока лишь незначительно влияло на влажность твердой фазы. Влажность твердых частиц на выходе колебалась в пределах 0,7–1,1 %.

Производительность установки ограничивается удельной нагрузкой по жидкой фазе до 50 м³/(м²·ч). При более высоком расходе наблюдалось накопление жидкости в нижней части аппарата и резкое возрастание влажности твердых частиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутепов А. М. Вихревые процессы для модификации дисперсных систем / А. М. Кутепов, А. С. Латкин. – М.: Наука, 1992. – 250 с.
2. Соломахова Д. С. Центробежные вентиляторы / Д. С. Соломахова. – М. Машиностроение, 1975. – 176 с.
3. Волк А. М. Течение вязкой жидкости в пространстве между движущимися проницаемыми поверхностями / А. М. Волк // Инженерно-физический журнал. – 1993, т. 62, № 2. – С. 152–158.
4. Волк А. М. Анализ сил, действующих на твердую частицу в сплошном потоке / А. М. Волк, Е. В. Терешко // Труды БГТУ. – 2015. – № 6: Физ.-мат. науки и информатика. – С. 10–14.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ИЗДЕЛИЯ В БЕСПИЛОТНЫХ СИСТЕМАХ

М.В. ДЯДЕНКО, И.А. ЛЕВИЦКИЙ, А.Ч. ГОРДЕЙКО

Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

Использование волоконно-оптических технологий в беспилотных системах в первую очередь связано с обеспечением высоконадежной защиты в передаче данных.

Основой получения волоконно-оптических элементов является жесткое многожильное оптическое волокно, состоящее из световедущей жилы, светоотражающей и защитной оболочек, для изготовления которых используют оптические стекла типа тяжелые баритовые флинт, кроны и легкие кроны. Они различаются величиной показателя преломления и коэффициента дисперсии, от которых зависит расположение составов таких стекол на диаграмме Аббе.

Использование волоконно-оптической продукции, в том числе и в БАК, требует научного обеспечения производства изделий волоконной оптики, направленного на повышение качества волоконно-оптических элементов различного назначения (жгуты, ВОПы, фоконы, поворотники) и стабилизацию технологических процессов их изготовления.

Качество волоконно-оптических изделий во многом определяется согласованием стекол для световедущей жилы, светоотражающей и защитной оболочек оптического волокна по оптическим, термическим и реологическим характеристикам, что предопределяет комплексный подход при разработке таких материалов. Волоконно-оптические элементы (волоконно-оптические пластины и жгуты, твистеры, фоконы), используемые в беспилотных системах, должны отвечать целому ряду требований, таких как вакуумплотность, чистота поля зрения, требуемая контрастность.

Одной из основных оптических и эксплуатационных характеристик оптического волокна является его числовая апертура (A), которая пропорциональна разнице квадратов показателей преломления световедущей жилы и светоотражающей оболочки. Использование оптического волокна и волоконно-оптических элементов (ВОЭ) на его основе в беспилотных авиационных комплексах (БАК) связано с обеспечением их вакуумплотности и требуемой частотно-контрастной характеристики, которые достигаются при условии $A > 1,0$.

Процесс изготовления ВОЭ является многостадийным, включает вытягивание одножильного световода (ОЖС), перетяжку пакета одножильных волокон с целью формирования многожильного световода (МЖС) и прессование пакета МЖС. Стабильность процесса изготовления ВОЭ и их качество существенно зависят от технологических характеристик стекол для оптического волокна. Изменение их показателей вязкости влияет на толщину оболочек и качество вытягиваемого волокна. Увеличение толщины светоотражающей оболочки при постоянном диаметре оптического волокна приводит к сокращению площади, занимаемой световедущей жилой («рабочая площадь»), и снижению пропускной способности изделия.

Получение оптических стекол для световедущей жилы и светоотражающей оболочки с показателем ослабления не выше $0,40 \text{ мм}^{-1}$ обеспечивается путем использования при составлении шихты сырьевых материалов квалификации не ниже «осч», синтеза стекол в платиновом сосуде в соответствии со строго заданным температурно-временным режимом и тщательным перемешиванием стекломассы с достижением требуемого уровня ее химической и термической однородности.

В настоящее время изготовление ОЖС осуществляется по двум основным технологиям: фильерным и штабиковым методами.

Фильерный метод связан с использованием установки, представляющей собой два коаксиально расположенных платиновых сосуда. Во внутренний платиновый сосуд, снабженный рядом перегородок, помещается стеклогранулят световедущей жилы, при этом внешний сосуд разделен перегородкой на две ячейки. Данное технологическое решение вызвано необходимостью раздельной засыпки стекол для светоотражающей и защитной оболочек.

Расплавленное стекло световедущей жилы протекает тонким слоем через лабиринт перегородок, что обеспечивает качественное осветление, заключающееся в удалении из стекла мелких пузырей воздуха. Нижняя часть установки для вытягивания ОЖС представляет собой выработочную фильеру, которая имеет коаксиально расположенные патрубки круглого сечения, соединённые с выпускными камерами.

Выпускные патрубки выработочной фильеры стекла светоотражающей и защитной оболочек расположены таким образом, что обеспечивается совместное одновременное истечение стекла световедущей жилы из внутреннего сосуда, которое покрывается стеклами светоотражающей и защитной оболочек.

В процессе апробации разработанных в БГТУ составов стекол для оптического волокна в условиях ОАО «Завод Оптик» проведена оценка влияния геометрических параметров оптического волокна (толщина

светоотражающей и защитной оболочек), технологических параметров изготовления волоконно-оптических изделий (температура, давление) на их эксплуатационные характеристики.

Экспериментально определено, что увеличение размера защитной оболочки по сечению одножильного световода за счет повышения массы капли, сходящейся в процессе наплавления жилы, делает световод более хрупким, и, как следствие, уменьшает выход годной продукции. Вместе с тем, рост толщины защитной оболочки вызывает уменьшение неравномерности пропускания (явление «пестроты») многожильным световодом в процессе его перетяжки.

Особенностью производства изделий волоконной оптики является согласование стекол световедущей жилы, светоотражающей и защитной оболочек по показателям вязкости. Так, нарушение данного условия приводит к появлению характерного вида брака по всему полю зрения волоконно-оптического элемента – дефектной сетке в виде серых и черных точек и штрихов в центре граней. Обнаружено, что указанные дефекты вызваны продолговатыми «дырами» в центре граней МЖС, эквивалентными длине 2-х и более ОЖС, и сужением оболочек световодов парных рядов ОЖС по центру граней. Это является причиной низкого выхода годных изделий во всех опытных партиях.

Дефектная сетка присутствует в образцах волоконно-оптических блоков, где не произошло полное смыкание граней МЖС в связи с высокой вязкостью стекла защитной оболочки.

Устранение данного дефекта осуществлялось путем понижения температуры прессования. Однако при этом нарушалась вакуумплотность волоконно-оптических изделий в виду высоких значений вязкости стекла защитной оболочки, обуславливающих появление неплотностей на границах световодов в волоконно-оптическом блоке.

Экспериментально определено, что увеличение разницы между показателями вязкости световедущей жилы и оболочек в интервале температур прессования (650–675 °С) и изготовления поворотника (630–650 °С) обуславливает рост диффузии красителей из защитной оболочки в световедущую жилу. При скручивании заготовок с целью изготовления поворотника установлено, что образцы, в которых защитная оболочка имеет более высокую вязкость, чем световедущая жила, характеризуются повышенной температурой процесса скручивания и незначительной степенью диффузии компонентов из стекла защитной оболочки в световедущую жилу. Образцы ВОЭ, в которых размер оболочек одинаковый вследствие согласования трех стекол по показателям вязкости характеризуются отсутствием структурной

сетки в центральной зоне всех образцов, где температура и деформация световодов минимальная.

Кроме того, проводимые в настоящей работе исследования связаны с разработкой стекол для световедущей жилы, светоотражающей и защитной оболочек оптического волокна, согласованных по оптическим, термическим и реологическим характеристикам.

Это связано с тем, что для производства световедущей жилы оптического волокна используют составы стекол марок ТБФ 3–5, ТБФ 7–11, ТБФ 13, ТБФ 25 и марок ВС 58, ВС 80, ВС 82, ВС 82-1, ВС 83, ВС 92, базируемые на основе стекол систем $\text{BaO-La}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ и $\text{ZrO}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$, использование которых в настоящее время неоправданно из-за присутствия оксидов первого (PbO , CdO , As_2O_3) и второго классов опасности (ZnO , Sb_2O_3).

В настоящей работе стекло для световедущей жилы разработано на основе системы $\text{BaO-La}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-ZrO}_2\text{-Nb}_2\text{O}_5$ при постоянном содержании SiO_2 , B_2O_3 , ZrO_2 и Nb_2O_5 , составляющем 60 мол. %; стекло для светоотражающей оболочки – на основе системы $\text{K}_2\text{O-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$; стекло для защитной оболочки – на основе системы $\text{Na}_2\text{O-K}_2\text{O-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ с введением красителей CoO , Mn_2O_3 , Cr_2O_3 .

При разработке составов стекол для оптического волокна первоочередной задачей являлось их согласование по показателям вязкости в температурном интервале вытягивания оптического волокна и изготовления волоконно-оптических элементов, от которых зависит стабильность геометрических параметров оптического волокна. По результатам исследования реологических свойств стекол выявлены закономерности влияния их состава на показатели вязкости в интервале значений $10^9\text{--}10^4$ Па·с. Установлено, что на показатели реологических свойств стекол оказывает значительное влияние координационное состояние ионов бора.

Стекла для оптического волокна разработанных составов устойчивы к кристаллизации в интервале $600\text{--}1100$ °С при их термообработке в течение 24 ч, не взаимодействуют между собой на границе спая в процессе вытягивания волокна. Соотношение оптических постоянных стекол разработанных составов для световедущей жилы ($n_{e1} = 1,8050$) и светоотражающей оболочки ($n_{e2} = 1,4887$) обеспечивает числовую апертуру оптического волокна, составляющую 1,03.

Исследования выполнены при поддержке Министерства образования Республики Беларусь в рамках задания 2.1.04 (НИР 5) ГПНИ «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биоорхимия» подпрограммы «Химические технологии, процессы и реагенты».

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ОКРАСКИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А.Л. ЕГОРОВА

Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

Окраска беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) определяется их назначением, средой эксплуатации и требуемыми характеристиками покрытий.

При выборе лакокрасочных материалов, способов окраски, а также цветовых характеристик покрытий надо учитывать следующие факторы:

- необходимость в видимости или невидимости объекта;
- необходимость в маскировке в определенных условиях, т.е. слияние с фоном (земля, небо, вода);
- тепловой режим: светлые цвета отражают тепло, теплые поглощают;
- природа композитного материала, подлежащего окраске;
- эстетика и брендинг для гражданских и коммерческих моделей;
- стоимость и сложность нанесения.

Первоочередность вышеперечисленных факторов зависит от области применения БПЛА.

Для гражданских БПЛА при выборе лакокрасочных материалов определяющими являются черные, серые и белые цвета, что обеспечивает эстетику для создания современного и технологичного вида, что часто совпадает с естественным цветом композитного материала. Незаметность таких БПЛА зависит от пожеланий потребителей: некоторые предпочитают менее бросающиеся цвета, а другие наоборот – яркие цвета для лучшей ориентации пилота.

Промышленные (коммерческие) БПЛА часто окрашивают в белый, светло-серые, оранжевые, желтые и красные цвета с элементами логотипов компаний (брендинг). В строительстве и сельском хозяйстве важна видимость (яркие цвета обеспечивают лучшую заметность для безопасности полетов, особенно в зонах работы персонала) и терморегуляция (светлые цвета лучше отражают солнечный цвет, предотвращая перегрев, что особенно важно при работе в жарких условиях).

При выборе окраски военных (специализированных) БПЛА в первую очередь ориентируются на маскировку и незаметность. Поэтому выделяют несколько типов окраски в зависимости от функций, которые должен выполнять летательный аппарат:

- 1) камуфляж под окружающую среду:
 - пустынный (песочные, коричневые, желтые оттенки);
 - лесной (оттенки зеленого и коричневого);

- высотный (светло-голубые, светло-серые оттенки);
- морской (оттенки серого и синего);
- 2) радиопоглощающая окраска специальными материалами (матовые темно-серые или черные цвета) для уменьшения радиолокационной заметности;
- 3) антибликовые покрытия (матовые), не отражающие свет и делающие БПЛА менее заметными;
- 4) ночной камуфляж (матовые черные или очень темно-серые цвета) для незаметной работы в темное время суток.

БПЛА для научных или исследовательских целей могут быть разнообразны по цветовой окраске: часто используют белые оттенки для хорошей терморегуляции или яркие для легкой идентификации и поиска в случае падения.

Учитывая вышесказанное, можно сделать вывод, что окраска БПЛА может быть разнообразна в зависимости от их назначения. Но во всех случаях необходимо знать, что лакокрасочные покрытия должны быть высокого качества, обладать специфическими свойствами, и помнить, что общая толщина покрытий должна быть минимальной, т.к. масса лакокрасочного покрытия учитывается при расчете массы аппарата [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Краски, покрытия, растворители / Д. Стойе, В. Фрейтаг (ред.): пер. с англ. Под ред. Ицко. – СПб.: Профессия. 2007. 258 с.

УДК 53.098: 54.057

ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ БПЛА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ПОВРЕЖДЕНИЙ

В.В. ЖИЛИНСКИЙ¹, А.М. МИЛЮКОВА², В.В. ЧАЕВСКИЙ³

¹Белорусский государственный технологический университет

²ФТИ НАН Беларуси

³Белорусский государственный университет

информатики и радиоэлектроники

Минск, Беларусь

Развитие авиационных технологий привело к активному использованию беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В настоящее время беспилотная авиация используется более чем в 20 сферах народного

хозяйства, а именно: контроль состояния производственных объектов, строительных площадок, нефте- и газопроводов, мониторинг природных ресурсов, научные исследования, аэрофотосъемка, доставка грузов, охрана и др. [1]. Стоимость БПЛА может достигать до сотен тысяч долларов. Поэтому защита материалов для БПЛА является насущной проблемой при массовом производстве. Причины повреждений материалов БПЛА связаны как с внешними факторами, такими как механические удары, воздействие окружающей среды (температура, влажность, химическое воздействие), так и с внутренними факторами, включающими усталостное разрушение материалов корпуса и крыла при циклических нагрузках сжатие-растяжение во время полета [2].

Целью данной работы было изучение влияния магнитно-импульсной обработки (МИО) на прочность поверхности образцов из стали 50ХГФА с гальваническим хромовым покрытием и без него. Хромовое покрытие на поверхность образца из стали 50ХГФА было осаждено из электролита ($\text{CrO}_3 - 250 \text{ г/дм}^3$; $\text{H}_2\text{SO}_4 - 2,5 \text{ г/дм}^3$) при плотности тока 50 А/дм^2 при температуре $50 - 60^\circ\text{C}$. Толщина сформированных покрытий составила $13 - 15 \text{ мкм}$.

Образцы из стали марки 50ХГФА обработаны на установке МИУ-3 (ФТИ НАН Беларуси) 5 импульсами (8 кДж). Изучение структурно-фазового состояния и макронапряжений II рода образцов проводились на рентгеновском дифрактометре GNR EXPLORER в $\text{Cu-K}\alpha$ излучении. Микроструктура стали была проанализирована методом дифракции отраженных электронов (ДОЭ) с использованием микроскопа Hitachi S-4800. Измерения твердости проводились на универсальном твердомере AFFRI-URBV-VRS (нагрузка 750 кгс , диаметр шарика 5 мм), что соответствует шкале Бринелля (HB).

Рис. 1 показывает, что сталь 50ХГФА содержит фазы $\alpha\text{-Fe}$ и Fe_3C после магнитно-импульсной обработки.

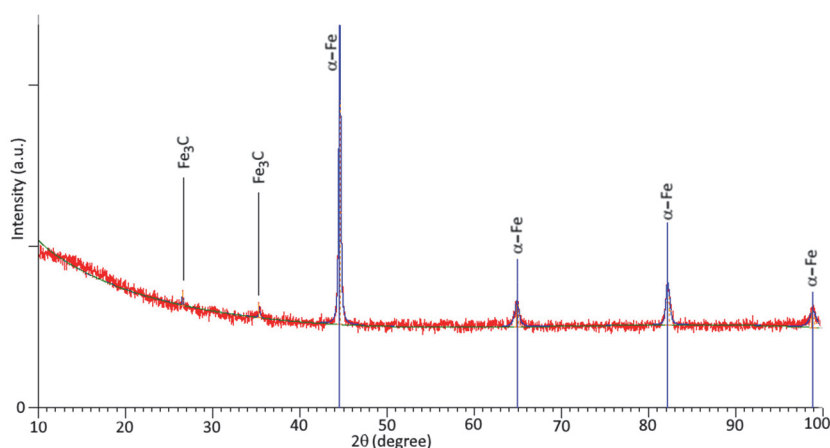


Рис. 1. Дифрактограмма образцов стали 50ХГФА после магнитно-импульсной обработки

На основании данных рис. 2 также можно заключить, что стальной образец содержит фазу α -Fe.

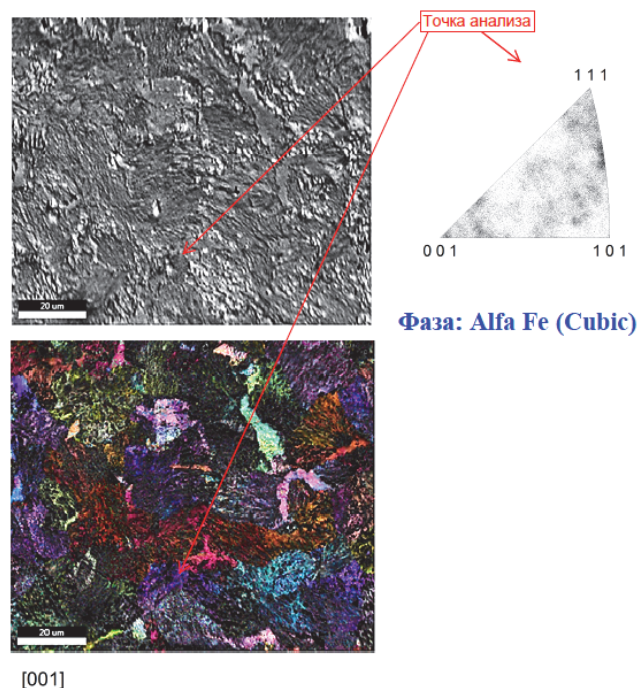


Рис. 2. Дифракция отражённых электронов образцов стали 50ХГФА после магнито-импульсной обработки.

Анализ результатов измерения макронапряжений II рода показывает, что на поверхности образцов из стали 50ХГФА после магнито-импульсной обработки макронапряжения были сжимающие (-1,147 ГПа). Сжимающие остаточные напряжения способствуют повышению прочности, т. к. суммируясь с напряжениями от внешней нагрузки. Они уменьшают результирующие растягивающие напряжения в поверхностном слое детали и препятствуют зарождению усталостных трещин. Нанесение хромового покрытия на поверхность стального образца никак не влияло на величину макронапряжения после магнито-импульсной обработки [3]. Этот факт подтверждают исследования ориентации кристаллитов стали, текстура которых (плоскость [001]) не менялась после магнито-импульсной обработки (рис. 2). Однако, измерения электросопротивления показали, что на глубине ~15 мкм (толщина Cr-покрытия) после магнито-импульсной обработки наблюдается уменьшение величины электросопротивления, что говорит об его уплотнении кристаллической структуры под покрытием. Твердость поверхности образца из стали 50ХГФА с хромовым покрытием составляет 250 – 280 НВ, что несколько больше твердости поверхности образца из стали 50ХГФА без покрытия, которая равна 260 – 266 НВ. Магнито-импульсная обработка образца из стали

50ХГФА с хромовым покрытием позволила увеличить твердость всей системы до 255 – 285 НВ.

Таким образом, нанесение хромового покрытия на поверхность образца из стали 50ХГФА с последующей магнито-импульсной обработкой являются эффективным способом увеличения прочности поверхности для исключения усталостного разрушения при циклических нагрузках сжатие-растяжение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филиппов А.А., Олейников Е.П. История и перспективы применения беспилотных летательных аппаратов // Решетневские чтения: материалы XXIII Междунар. науч.-практич. конф.: в 2-х ч. Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнева, 2019. – Ч. 1. – С. 463-464.

2. Путилина П.М., Куцевич К.Е., Исаев А.Ю. Полимерные композиционные материалы на основе углеродных и стеклянных волокон для изготовления деталей беспилотных летательных аппаратов и перспективы их развития // Труды ВИАМ. – М., 2023. – № 8 (126). – С. 85-100.

3. Алифанов А.В., Ционенко Д.А., Милюкова А.М., Ционенко Н.М. Магнитострикционный механизм образования мелкодисперсной структуры в стальных изделиях при магнитно-импульсном воздействии // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук, 2016. – № 4. – С. 31 - 36.

УДК 678.027.3:001.895

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТЕКЛО- И УГЛЕПОЛНЕННЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ ДЛЯ ПЕЧАТИ ДЕТАЛЕЙ БЕСПИЛОТНОЙ ТЕХНИКИ

О.И. КАРПОВИЧ¹, Г.А. ВЕЛИЧКО²

¹Белорусский государственный технологический университет

²УП «НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО»

Минск, Беларусь

Одной из самых распространенных технологий 3Д-печати является технология экструзии материала [1-2]. Для печати могут использоваться различные термопластичные полимеры, но для изготовления

нагруженных элементов весьма перспективными являются стекло- и угленаполненные материалы. Применение таких материалов позволяет существенно повысить показатели прочности и жесткости изделий. Весьма перспективным является применение таких материалов для изготовления корпусных деталей беспилотной техники.

Механические показатели материала получаемых 3Д печатью изделий существенно зависят от параметров печати (скорости печати, температуры печати и т.п.). Производители материалов для 3Д-печати указывают, как правило, довольно широкий интервал рекомендуемых параметров печати, что не позволяет получить оптимальные механические характеристики. Поэтому установление влияния параметров печати на механические характеристики является актуальной задачей.

Исследовали композиционные материалы, используемые для 3Д-печати по технологии экструзии материала: *NYLFORCE GLASS*, диаметр 2,85 мм (стеклонаполненный полиамид), производитель *Fiber Force*, Италия; *NYLFORCE CARBON*, диаметр 2,85 мм (угленаполненный полиамид), производитель *Fiber Force*, Италия; *Ultrafuse PET CF 15*, диаметр 1,75 мм (угленаполненный полиэтилентерефталат), производитель *BASF*, Германия.

Образцы для испытаний изготавливали на 3Д принтерах *Ultimaker 3+* (*NYLFORCE GLASS*, *NYLFORCE CARBON*) и *Anycubic* (*Ultrafuse PET CF 15*). При печати образцов варьировали режимы (температуру печатающей головки, скорость печати). Режимы печати образцов принимали из диапазона режимов, рекомендуемого производителем.

Определяли модуль упругости E_p , разрушающее напряжение σ_p при растяжении, модуль упругости $E_{\text{и}}$, разрушающее напряжение $\sigma_{\text{и}}$ при изгибе. Модуль упругости E_p , разрушающее напряжение σ_p при растяжении определяли на испытательной машине *MTS Criterion* по ГОСТ 34370 – 2017, используя образцы типа 2 (в форме лопаток). При определении модуля упругости использовали одноосевой экстензометр *MTS*. Модуль упругости $E_{\text{и}}$, разрушающее напряжение $\sigma_{\text{и}}$ при изгибе определяли по трехточечной схеме по ГОСТ 4648–2014.

Зависимости модуля упругости и предела прочности при растяжении исследуемых материалов аддитивного синтеза от параметров печати показаны на рис. 1.

Модуль упругости при растяжении для материалов в исследуемом диапазоне изменяется в зависимости от параметров печати (скорости и температуры головки). Для материала *NYLFORCE GLASS* изменение

модуля упругости при растяжении от скорости печати в пределах 12 %, от температуры печати в пределах 40 %. Максимальное значение модуля упругости при растяжении для данного материала наблюдали при скорости 30 мм/с и температуре печати 250 °С.

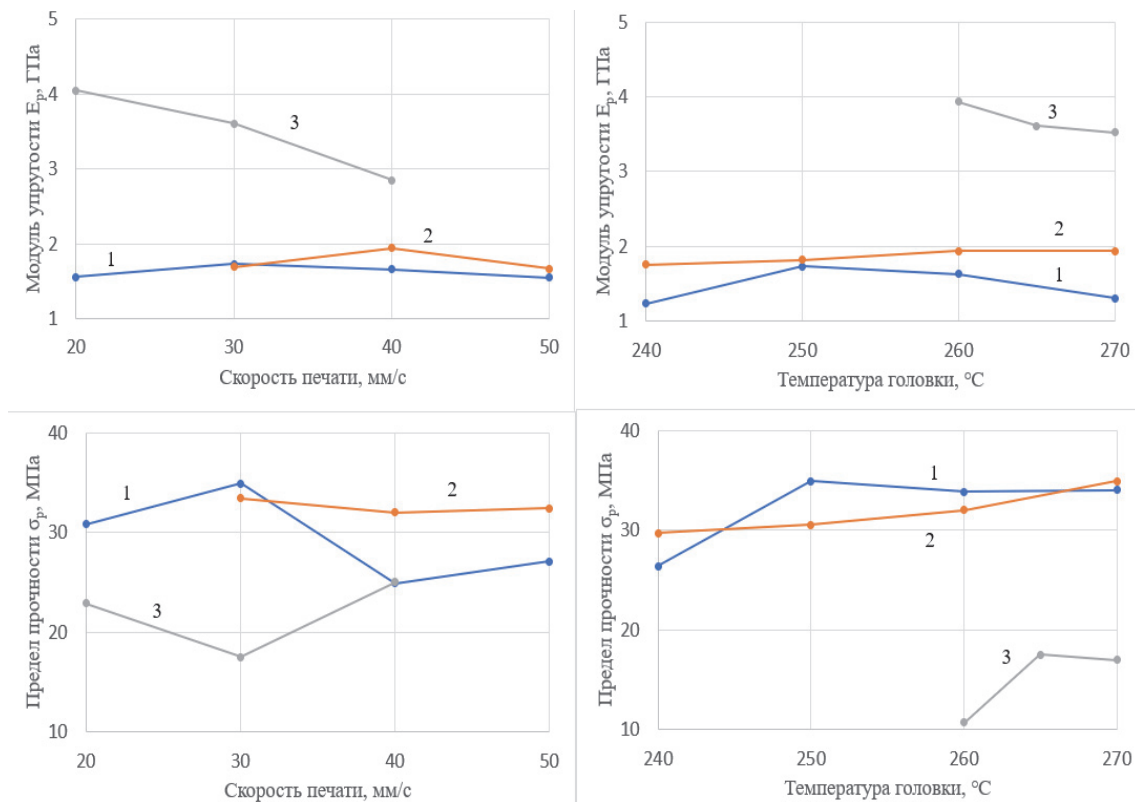


Рис.1. Зависимости модуля упругости и предела прочности при растяжении от параметров печати: 1 – NYLFORCE GLASS; 2 – NYLFORCE CARBON; 3 – Ultrafuse PET CF 15

Для материала *NYLFORCE CARBON* изменение модуля упругости при растяжении от скорости печати в пределах 16 %, от температуры печати в пределах 10 %. Максимальное значение модуля упругости при растяжении для данного материала наблюдали при скорости 40 мм/с и температуре печати 260 °С.

Для материала *Ultrafuse PET CF 15* изменение модуля упругости при растяжении от скорости печати в пределах 42 %, от температуры печати в пределах 12 %. Максимальное значение модуля упругости при растяжении для данного материала наблюдали при скорости 20 мм/с и температуре печати 260 °С.

Максимальные значения предела прочности при растяжении для материала *NYLFORCE GLASS*, как и для модуля упругости, наблюдали при скорости 30 мм/с и температуре печати 250 °С.

Предел прочности при растяжении для материала *NYLFORCE CARBON* практически не зависит от скорости печати и увеличивается с увеличением температуры головки. Максимальное значение предела прочности при растяжении для материала *NYLFORCE CARBON* соответствует температуре печати 270 °С.

Максимальные значения предела прочности при растяжении для материала *Ultrafuse PET CF 15* наблюдали при скорости 40 мм/с и температуре печати 265 °С.

Зависимости модуля упругости и предела прочности при изгибе исследуемых материалов аддитивного синтеза от параметров печати показаны на рис. 2.

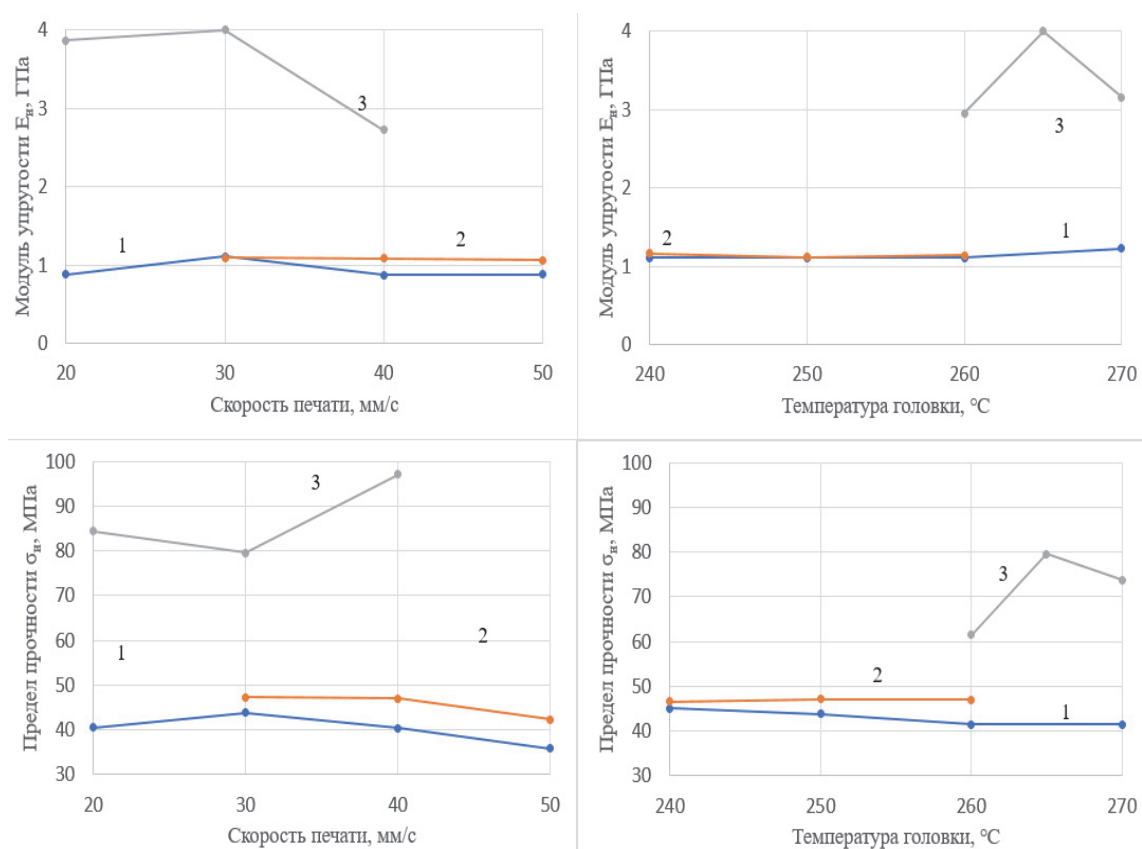


Рис. 2. Зависимости модуля упругости и предела прочности при изгибе от параметров печати: 1 – *NYLFORCE GLASS*; 2 – *NYLFORCE CARBON*; 3 – *Ultrafuse PET CF 15*

Для материала *NYLFORCE GLASS* изменение модуля упругости при изгибе от скорости печати в пределах 35 %, от температуры печати в пределах 11 %. Максимальное значение модуля упругости при растяжении для данного материала наблюдали при скорости 30 мм/с и температуре печати 250 °С, как и для растяжения.

Для материала *NYLFORCE CARBON* модуль упругости при изгибе от скорости печати и от температуры печати практически не зависит.

Для материала *Ultrafuse PET CF 15* изменение модуля упругости при изгибе от скорости печати в пределах 47 %, от температуры печати в пределах 36 %. Максимальное значение модуля упругости при растяжении для данного материала наблюдали при скорости 30 мм/с и температуре печати 260 °С.

Характеристики прочности и модуля упругости при растяжении материалов аддитивного синтеза *NYLFORCE GLASS* и *Ultrafuse PET CF 15* при различных направлениях печати (по отношению к оси образца) представлены в таблице.

Характеристики материалов аддитивного синтеза

Характеристика	Направление печати, °		
	0	±45	90
NYLFORCE GLASS (температура головки 250°C, скорость печати 40 мм/с)			
Модуль упругости при растяжении E_p , ГПа	2,48	1,66	—
Предел прочности при растяжении σ_p , МПа	39,8	24,9	—
Модуль упругости при изгибе $E_{и}$, ГПа	1,39	0,87	—
Предел прочности при изгибе $\sigma_{и}$, МПа	43,4	40,3	—
Ultrafuse PET CF 15 (температура головки 260°C, скорость печати 30 мм/с)			
Модуль упругости при растяжении E_p , ГПа	6,98	3,61	3,61
Предел прочности при растяжении σ_p , МПа	51,05	17,5	37,1
Модуль упругости при изгибе $E_{и}$, ГПа	5,14	4,00	3,28
Предел прочности при изгибе $\sigma_{и}$, МПа	46,6	79,5	70,3

Из таблицы видно, что механические характеристик существенно зависят от направления печати. Максимальные значения прочности и модуля упругости для материалов соответствует углу 0° по направлению к оси образца, а минимальные – углу 90° по направлению к оси образца. Однако действующие на изделия нагрузки не всегда совпадают с его продольной осью. Поэтому для изделий, испытывающих действие нагрузки в различных направлениях целесообразно производить печать под углом $\pm 45^\circ$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гибсон Я. Технологии аддитивного производства / Я. Гибсон, Д. Розен, Б. Стакер. – М: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 656 с.
2. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш. – М: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ УГЛЕТКАНИ CW200 И ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ LR285

О.И. КАРПОВИЧ¹, Г.А. ВЕЛИЧКО², Д.Ю. ВЕШТОРТ³

¹Белорусский государственный технологический университет,

²УП «НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО»

³РУП «НПЦ многофункциональных беспилотных комплексов» НАНБ
Минск, Беларусь

Беспилотные летательные аппараты (БЛА) относятся к наукоемкой высокотехнологичной авиационной отрасли, требующей значительных капиталовложений в научные исследования, технологии, конструктивные разработки и производство. Данный вид продукции востребован на мировом рынке и характеризуется высокой добавленной стоимостью.

На данный момент существуют БЛА разных типов, отличающиеся по конструкции, размерам, грузоподъемности и другим параметрам. Элементы конструкции, чаще всего, представляют собой детали простой формы, что позволяет применять стандартизированные изделия в качестве деталей для сборки. По этой причине для изготовления аппаратов закупают стандартизированные элементы. В существующих конструкциях рам БЛА мультироторного типа используются импортные материалы и комплектующие, в том числе и элементы несущей системы.

В Республике Беларусь имеется необходимая база и технологические процессы для изготовления всех необходимых элементов несущей системы беспилотных летательных аппаратов, в том числе из композиционных материалов. Применяя методы, распространенные на предприятиях, такие как контактное формование, намотка, вакуумная инфузия и формование эластичной диафрагмой, можно осуществить импортозамещение стандартных деталей [1].

Механические характеристики композиционных материалов существенно зависят от выбора технологии изготовления и технологических параметров процесса [2]. Поэтому установление влияния выбора технологии изготовления на механические характеристики материалов получаемых изделий является актуальной задачей.

Исследовали композиционные материалы на основе углеткани CW200 и эпоксидного связующего. Массовое содержание наполнителя (углеродной ткани) – 50 %. В качестве связующего использовали эпоксидную смолу

LR285 и отвердитель LH285. Массовое содержание связующего – 50 % (100 м.ч. смола LR285 и 50 м.ч. отвердитель LH285). Из указанных компонентов методами формования эластичной диафрагмой (на базе РУП «НПЦ многофункциональных беспилотных комплексов» НАНБ) и вакуумной инфузии (на базе ООО «Современные композиты») изготавливали плиты с размерами 250×250 мм. Количество слоев – 8. При изготовлении плит слои ткани чередовали, укладывая под углом 0 и 90°. Из полученных плит вырезали образцы для определения механических характеристик. Образцы вырезали вдоль и под углом 45°.

Для композиционных материалов на основе углеткани CW200 и эпоксидного связующего определяли коэффициент Пуассона, модуль упругости E_p , разрушающее напряжение σ_p при растяжении, модуль упругости $E_{из}$, разрушающее напряжение $\sigma_{из}$ при изгибе.

Коэффициент Пуассона, модуль упругости E_p , разрушающее напряжение σ_p при растяжении определяли на испытательной машине MTS Criterion по ГОСТ 32656 – 2017, используя образцы типа 3. При определении коэффициента Пуассона и модуля упругости использовали двухосевой экстензометр MTS.

Модуль упругости $E_{из}$, разрушающее напряжение $\sigma_{из}$ при изгибе определяли по трехточечной схеме по ГОСТ Р 56805–2015.

В таблице содержатся результаты испытания композиционного материала на основе углеткани CW200 и эпоксидного связующего на растяжение и изгиб, изготовленных методами формования эластичной диафрагмой и вакуумной инфузии.

Результаты испытаний на растяжение и изгиб

Характеристика	Направление	
	0, 90°	45°
Метод изготовления – контактное формование		
Модуль упругости при растяжении E_p , ГПа	42,0 (3,5)	12,6 (6,2)
Коэффициент Пуассона	0,048 (15,4)	0,73 (1,6)
Предел прочности при растяжении σ_p , МПа	410,9 (12,2)	91,2 (6,4)
Модуль упругости при изгибе $E_{из}$, ГПа	20,4 (13,8)	–
Предел прочности при изгибе $\sigma_{из}$, МПа	484,3 (11,4)	–
Метод изготовления – вакуумная инфузия		
Модуль упругости при растяжении E_p , ГПа	57,2 (4,1)	14,9 (3,7)
Коэффициент Пуассона	0,052 (8,5)	0,74 (1,3)
Предел прочности при растяжении σ_p , МПа	730,3 (5,7)	118,3 (3,0)
Модуль упругости при изгибе $E_{из}$, ГПа	32,2 (11,9)	–
Предел прочности при изгибе $\sigma_{из}$, МПа	646,2 (15,0)	–

Примечание. В скобках указан коэффициент вариации, %.

Из результатов испытаний видно, что композиционный материал, изготовленный методом вакуумной инфузии обладает более высокими механическими характеристиками, чем материал, изготовленный методом формования эластичной диафрагмой. Среднее значение прочности при растяжении (в направлении 0, 90°) для образцов, изготовленных методом вакуумной инфузии на 77 % выше, чем для образцов, изготовленных методом формования эластичной диафрагмой. Среднее значение модуля упругости при растяжении (в направлении 0, 90°) для образцов, изготовленных методом вакуумной инфузии на 36 % выше, чем для образцов, изготовленных методом формования эластичной диафрагмой.

Для образцов, изготовленных методом вакуумной инфузии среднее значение прочности и модуля упругости при растяжении в направлении 0, 90° в 6,1 и 3,8 раза соответственно выше, чем характеристики в направлении 45°. Для образцов, изготовленных методом формования эластичной диафрагмой среднее значение прочности и модуля упругости при растяжении в направлении 0, 90° в 4,5 и 3,3 раза соответственно выше, чем характеристики в направлении 45°.

Коэффициент Пуассона практически не зависит от технологии изготовления образцов, и составляет около 0,05 для направления 0, 90° и около 0,70 для направления 45°.

При изгибе модуль упругости получили в среднем в два раза ниже, чем модуль упругости при растяжении.

Для вакуумной инфузии при изгибе, так же, как и при растяжении, получили значения прочности и модуля выше, чем для формования эластичной диафрагмой.

В целом результаты испытаний говорят о том, что при вакуумной инфузии (при тех же степенях наполнения) получается материал с более высокими механическими характеристиками. Т.е. данный метод более целесообразен для изготовления несущих элементов БЛА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Максимцова А.В., Величко Г.А., Карпович О.И. Применение композиционных материалов в элементах конструкции беспилотных летательных аппаратов мультироторного типа // Беспилотные аппараты «БПЛА – 2024»: сб. ст. Междунар. молодежного форума. Минск, 22–26 апреля 2024 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; отв. за изд. И. В. Войтов. Минск: БГТУ, 2024. – с. 198–201.

2. Ставров В.П. Формообразование изделий из композиционных материалов: учеб. Пособие / В.П. Ставров. – Минск: БГТУ, 2006. – 482 с.

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ КОПТЕР СО СКЛАДЫВАЮЩИМИСЯ ЛУЧАМИ

О.И. КАРПОВИЧ¹, Г.А. ВЕЛИЧКО²

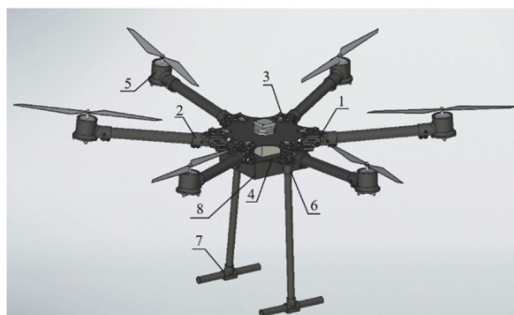
¹Белорусский государственный технологический университет

²УП «НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО»

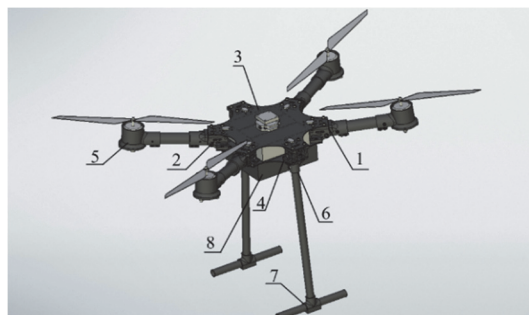
Минск, Беларусь

С каждым новым поколением беспилотных летательных аппаратов их конструкция совершенствуется и становится более сложной, а размеры и производительность увеличиваются. С развитием беспилотных летательных аппаратов возникает проблема размеров, которая затрудняет транспортировку и хранение. Поэтому для решения данной проблемы прибегают к складным вариантам несущих лучей мультикоптеров. Так же существует потребность в беспилотной технике, в которой за счет незначительных изменений, с использованием одного и того же корпуса и начинки, можно изменить назначение и выполняемые функции. В данном случае под универсальностью понимается многоцелевое использование коптера за счет оперативного изменения его конфигурации.

В работе предложена конструкция коптера, которая за счет небольших изменений конфигурации может преобразовываться из гексакоптера в квадрокоптер. Гексакоптер может применяться для обработки и орошения полей, транспортировки грузов, а также для специального использования, квадрокоптер – для проведения инспекций, мониторинга и сканирование посевных площадей и т.п.



гексакоптер



квадрокоптер

Рис.1. Конструкция универсального коптера: 1 – пластина боковая; 2 – держатель луча; 3 – пластина верхняя; 4 – пластина нижняя; 5 – держатель мотора; 6 – крепление ножки; 7 – муфта ножки; 8 – крышка батареи

Конструкция разработанного универсального коптера показана на рисунке 1. В конфигурации «гексакоптер» в конструкции предусмотрены

8 складывающихся лучей. Для складывания лучей используется специальный механизм, конструкция которого показана на рисунке 2. Преобразование коптера в конфигурацию «квадрокоптер» осуществляется за счет снятия двух центральных лучей вместе со своими механизмами складывания. При этом устанавливаются более короткие лучи. Сам корпус и основные компоненты не меняются. В таблице указаны основные характеристики коптера в обеих модификациях.

Характеристики универсального коптера

Технические характеристики	Квадрокоптер	Гексакоптер
Габаритные размеры (в разложенном состоянии), мм	895x895x550	1370x1370x555
Габаритные размеры (в сложенном состоянии), мм	442x442x507	505x505x507
Длина луча, мм	150	290
Диаметр пропеллера, дюйм	9	16
Взлетный вес, кг	до 8	до 30
Полезная нагрузка, кг	до 3	до 20

В конструкции основных несущих элементов универсального коптера использовали композиционный материал на основе эпоксидной смолы LR285 и углеродной ткани CW200. Для изготовления оригинальных деталей механизма складывания лучей, держателей двигателей, крышки батарей использовали 3Д-печать на принтере Stratasys Fortus 450mc (материал – ABS-M30 от компании Stratasys).

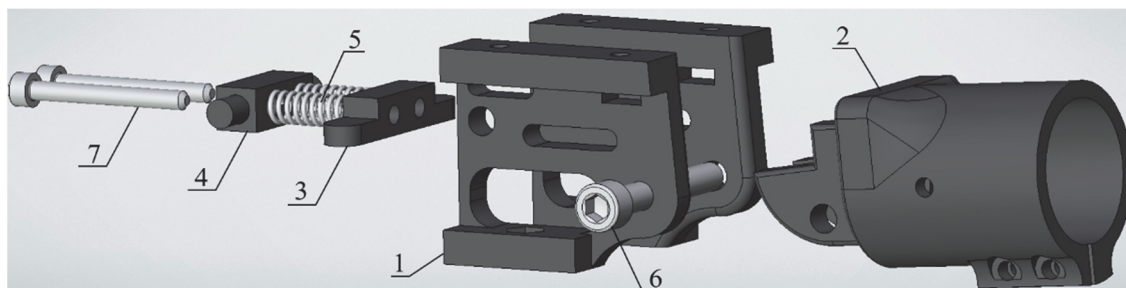


Рис.2. Конструкция механизма складывания: 1 – боковая пластина; 2 – держатель луча; 3 – бегунок; 4 – направляющая; 5 – пружина; 6 – ось

Таким образом, разработанный универсальный коптер, за счет оперативного изменения конфигурации может использоваться для различных целей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Максимцова А.В., Величко Г.А., Карпович О.И. Применение композиционных материалов в элементах конструкции беспилотных

летательных аппаратов мультироторного типа // Беспилотные аппараты «БПЛА – 2024»: сб. ст. Междунар. молодежного форума. Минск, 22–26 апреля 2024 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; отв. за изд. И. В. Войтов. Минск: БГТУ, 2024. – с. 198–201.

УДК 620.193.28+678.07

СТРУКТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ СПЛАВОВ МАГНИЯ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

И.И. КУРИЛО, А.А. КАСАЧ, Е.О. БОГДАН, А.Р. ЦЫГАНОВ
Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

Сплавы магния привлекают большое внимание разработчиков беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) благодаря исключительно низкой плотности и высокому отношению прочности к массе. В конструкциях фюзеляжа, несущих рам, узлов шасси и некоторых элементов электроники использование магниевых сплавов позволяет заметно снизить массу аппарата, увеличить полезную нагрузку и продлить время полета при тех же энергетических ресурсах. Однако магний – коррозионно-активный металл и при эксплуатации в атмосферных или агрессивных средах он склонен к коррозии, особенно в присутствии влаги, солей и наличии электрических контактов с более электроположительными металлами. Контакт магния с алюминием, медью или сталью приводит к образованию гальванических пар и, как следствие, к ускоренному коррозионному разрушению. Поэтому в конструкциях БПЛА критически важно учитывать электрическую изоляцию сочленений и выбор совместимых материалов при стыковке компонентов [1]. Для эффективного использования магниевых сплавов при изготовлении изделий авиационного назначения их поверхность необходимо защищать коррозионностойкими покрытиями. Для особо нагруженных или критичных узлов применяют методы поверхностного упрочнения и барьерной защиты с использованием плазменно-электролитического оксидирования (ПЭО) [2].

Целью работы являлось исследование влияния параметров процесса ПЭО на структуру и защитные свойства покрытий, формируемых на поверхности магниевых сплавов WE43 в пирофосфатном электролите.

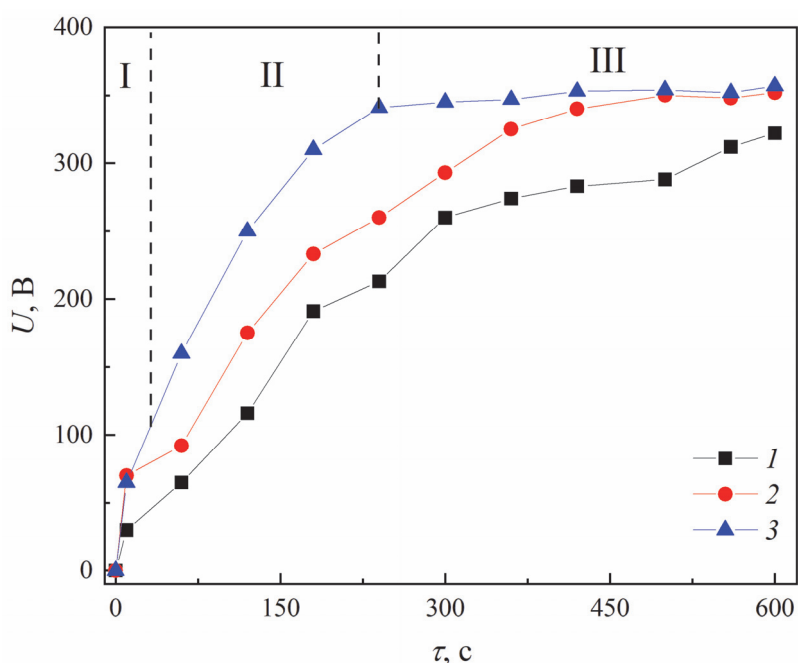
В качестве объекта исследования использовали содержащий редкоземельные элементы (РЗЭ) магниевый сплав марки WE43, номинальный состав которого представлен в таблице 1.

Табл. 1 – Элементный состав сплава

Содержание в сплаве, масс.%				
Y	Nd	РЗЭ	Zr	Mg
3.7	3.2	0.96	0.51	Баланс

ПЭО сплава WE43 проводили в пирофосфатном электролите, содержащем, г/дм³: Na₄P₂O₇ – 10; NaOH – 1. Процесс осуществляли в импульсном режиме при скважности импульсов 2 и частоте 2 Гц. Анодная плотность тока импульса составляла 20, 30 и 40 А/дм², а длительность обработки – 300, 450 и 600 с. Материалом катода служила нержавеющая сталь марки Х18Н9Т.

Для изучения влияния величины анодной плотности тока на процесс формирования ПЭО покрытий получены соответствующие хронограммы напряжения сплава WE43 (рис. 1).



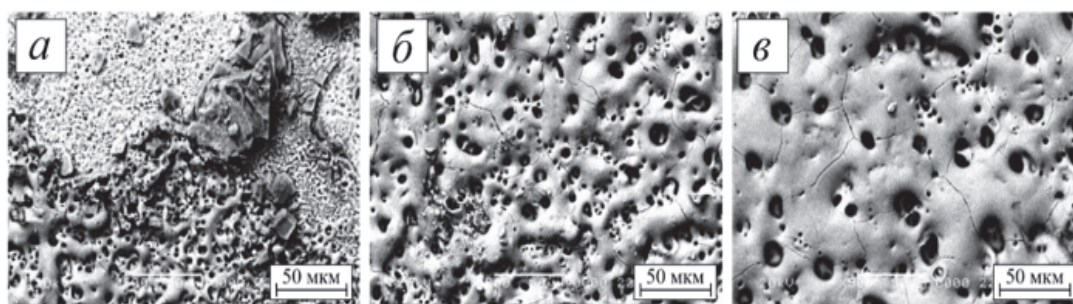
Анодная плотность тока ПЭО, А/дм²: 1 – 20; 2 – 30; 3 – 40.

Рис. 1 – Хронограммы напряжения ПЭО сплава WE43 в пирофосфатном электролите

Как видно из представленных данных, независимо от приложенной плотности тока на хронограммах напряжения можно выделить три характерные области, описывающие этапы протекания процесса. На первом

этапе наблюдается резкое увеличение напряжения, которое обусловлено образованием изолирующего слоя на поверхности анода (область I). После 20 с ПЭО угол наклона хронограмм существенно уменьшается, что обусловлено пробоем изолирующего слоя (область II). Плавное увеличение напряжения во времени на этом этапе сопровождается образованием многочисленных микроискровых разрядов по всей поверхности подложки, что указывает на протекание процесса в микродуговом режиме. При дальнейшем увеличении времени электрохимической обработки устанавливается постоянное значение напряжения, при котором процесс протекает в дуговом режиме (область III). Следует отметить, что по сравнению со вторым этапом в этой области наблюдается образование более сильных разрядов ярко-желтого цвета. С увеличением плотности тока ПЭО от 20 до 40 А/дм² время достижения постоянного значения напряжения снижается от 300 до 200 с, что обусловлено более быстрым формированием изолирующего слоя. После 450 с ПЭО хронограммы напряжения, полученные при плотностях тока 30 и 40 А/дм², накладываются друг на друга. При этом устанавливается напряжение, равное 350 В. После 600 с ПЭО при плотности тока 20 А/дм² напряжение также стабилизируется во времени и составляет около 300 В.

На рис. 2 представлены СЭМ изображения поверхности сплава WE43 после ПЭО. Как видно из полученных микрофотографий, поверхность образцов обладает неоднородной и микропористой структурой. Электрохимическая обработка в течение 300 с при анодной плотности тока 20 А/дм² приводит к формированию на поверхности магниевого сплава структурно неоднородных покрытий. Увеличение длительности процесса до 450–600 с способствует получению более однородных покрытий с равномерно распределенными порами.



Длительность обработки, с: а – 300; б – 450; в – 600.

Рис. 2 – СЭМ изображения поверхности образцов сплава WE43 после ПЭО при анодной плотности тока 20 А/дм²

На рис. 3 представлены поляризационные кривые исходного сплава WE43 и образцов после ПЭО, снятые в хлоридсодержащей коррозионной

среде (содержание NaCl 8 г/л). Как видно из полученных зависимостей, ПЭО образцов способствует смещению их стационарного потенциала в более электроотрицательную область.

Плотность тока коррозии исходного образца сплава WE43 составляет $3.32 \cdot 10^{-5}$ А/см². ПЭО сплава WE43 способствуют уменьшению скорости его коррозии в 4.1–31.6 раз, что обусловлено образованием структурированного покрытия, ограничивающего контакт металла подложки с электролитом. Более высокие значения коэффициентов b_a и b_k образцов после ПЭО указывают на увеличение поляризуемости катодного и анодного процессов. Как видно из представленных данных, скорость коррозии полученных образцов зависит от длительности и величины плотности тока ПЭО. Увеличение длительности ПЭО от 300 до 600 с приводит к снижению скорости коррозии полученных при плотности тока 20 А/дм² образцов в ≈ 2.8 раз.

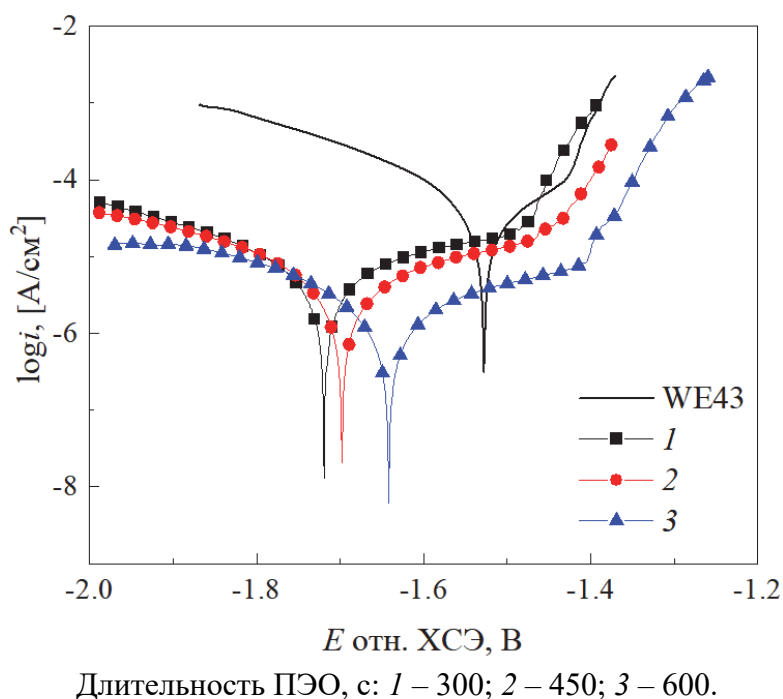


Рис. 3 – Поляризационные кривые в хлоридсодержащем растворе образцов сплава магния WE43 после ПЭО при анодной плотности тока 20 А/дм²

Таким образом установлено, что ПЭО приводит к формированию на поверхности магниевого сплава WE43 структурированных и микропористых покрытий, существенно повышающих коррозионную стойкость образцов. Увеличение анодной плотности тока и длительности обработки способствуют более быстрому формированию изолирующего слоя, увеличению однородности и защитных свойств покрытий. Полученные результаты показали перспективность использования

ПЭО как метода получения коррозионностойких материалов на основе магниевых сплавов, пригодных для использования в конструктивных элементах беспилотных летательных аппаратов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Atrens A. et al. Review of Mg alloy corrosion rates //Journal of magnesium and alloys. – 2020. – Vol. 8. – №. 4. – P. 989–998.
2. Yang C. et al. A review of corrosion-resistant PEO coating on Mg alloy //Coatings. – 2024. – Vol. 14. – №. 4. – P. 451.

УДК 678

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А.В. КАСПЕРОВИЧ, Ж.С. ШАШОК, Р.М. ДОЛИНСКАЯ, Е.П. УСС,
О.А. КРОТОВА, А.В. ЛЕШКЕВИЧ, В.В. БОБРОВА
Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

С каждым годом беспилотные летательные аппараты (БПЛА) становятся все более распространенными и востребованными в самых различных сферах – от сельского хозяйства и геодезии до военно-оборонной промышленности и доставки товаров. Одним из ключевых факторов, определяющих эффективность и надежность этих устройств, является выбор материалов, используемых в их конструкции. В этом контексте резина представляет собой уникальный и многофункциональный эластомерный композиционный материал, обладающий рядом свойств, которые делают ее незаменимой в производстве БПЛА.

Эластомерные материалы играют все более значимую роль в производстве беспилотных летательных аппаратов, предоставляя уникальные преимущества благодаря своим механическим свойствам. Данные материалы – это комбинация полимеров, которые обладают высокой гибкостью, прочностью и устойчивостью к внешним воздействиям, что делает их незаменимыми в аэрокосмической отрасли. Одним из основных достоинств использования эластомерных композиций является их способность эффективно поглощать удары и вибрации, что обеспечивает

защиту чувствительных электронных компонентов и улучшает общую надежность аппаратов. Эластомеры также отличаются стойкостью к воздействию ультрафиолетового излучения, влаги и температурных колебаний, что позволяет БПЛА работать в самых различных климатических условиях.

В производстве БПЛА используются различные типы каучуков. Например, синтетический бутадиен-стирольный и бутилкаучук преимущественно применяются для создания различных резиновых и резиноармированных уплотнителей и амортизаторов. Эти материалы характеризуются хорошими механическими свойствами и устойчивостью к износу, что особенно важно для компонентов, подверженных значительным нагрузкам. Натуральный каучук, в свою очередь, обладает отличными амортизационными свойствами и высокой эластичностью, что делает его идеальным для использования в деталях, которые требуют значительных деформаций. Однако стоит отметить, что натуральный каучук имеет ограниченную устойчивость к воздействию ультрафиолетового излучения. Эпоксидные и полиуретановые композиты часто выбираются за их высокую прочность и жесткость, что позволяет производить легкие и прочные конструкции. Силиконовые каучуки обеспечивают отличную термостойкость и устойчивость к химическим веществам, что делает их идеальными для применения в герметиках и изоляционных материалах, а также в защитных элементах БПЛА [1].

Актуальные тенденции в области применения эластомерных материалов включают инновационные разработки, направленные на создание новых композитов на основе биополимеров и переработанных материалов, что подчеркивает стремление к экологически чистому производству. Внедрение умных материалов с сенсорными технологиями позволяет создавать компоненты, которые могут адаптироваться к изменениям внешних условий или нагрузок в режиме реального времени. Эти технологии открывают новые горизонты для повышения функциональности и эффективности БПЛА. Также стоит отметить, что автоматизация и роботизация производственных процессов делают изготовление компонентов более эффективным, что в свою очередь способствует улучшению качества и снижению затрат на производство.

В заключение необходимо отметить, что, применение эластомерных композиционных материалов в производстве беспилотных летательных аппаратов представляет собой перспективное направление, способствующее улучшению характеристик и надежности этих устройств. С учетом роста спроса на БПЛА в различных сферах, можно ожидать, что роль эластомеров в этом сегменте будет только увеличиваться. Инновации в области материаловедения и технологий производства открывают

новые возможности для создания более устойчивых, легких и эффективных беспилотников, что делает использование эластомерных материалов эффективным и актуальным решением для будущего аэрокосмической отрасли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Anand S., Mishra A.K. High-Performance Materials used for UAV Manufacturing: Classified Review // International Journal of All Research Education and Scientific Methods. – 2022. – Vol. 10. – P. 2811–2819.

УДК 544.653.2

ФОРМИРОВАНИЕ АНОДНО-ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА СПЛАВАХ АЛЮМИНИЯ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ИМПУЛЬСНЫМ ТОКОМ

П.Б. КУБРАК, А.А. ЧЕРНИК, М.С. БОГДАНОВ

Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

Оксидный слой является одним из самых жаростойких и электроизоляционных видов покрытий на алюминии и его сплавах. Его теплопроводность значительно ниже, чем металла. Коэффициент теплового излучения оксидированного алюминия достигает 80 % излучения абсолютно чёрного тела. Пленки, полученные эматалированием алюминия, выдерживают нагрев до 500 °С без видимых изменений. Удельное объемное электросопротивление оксидной пленки 10^{12} - 10^{13} Ом · см. Пробивное напряжение в зависимости от толщины пленки и способа её получения изменяется от нескольких сот до нескольких тысяч вольт [1]. Однако, в настоящий момент времени актуальным остается вопрос модификации анодно-оксидных покрытий на алюминии и его сплавах с целью увеличения физико-химических и триботехнических свойств применяя различные режимы анодирования и составы электролитов. Одним из таких режимов является анодирование с использованием импульсной подачи тока (импульсное анодирование), которое можно охарактеризовать как комбинацию нормального и экстремального анодирования [2]. Используя различные параметры импульсного процесса, среди которых время, температура, предел плотности тока, частота и скважность, можно получить толстые и твердые анодные оксиды с

хорошей межфазной адгезией, обладающие повышенной коррозионной стойкостью и сопротивлением истиранию [3].

В настоящей работе исследовалось влияние импульсной токовой нагрузки на свойства получаемых анодно-оксидных покрытий на образцах из сплава алюминия АД31, который широко используется в автомобильной, авиационной, в частности при конструировании беспилотных летательных аппаратов, легкой и мебельной промышленности.

Процесс анодирования проводили в гальваностатическом режиме при импульсной и стационарной токовой нагрузке в электролите содержащем 180 г/дм³ серной кислоты. Предварительная подготовка образцов осуществлялась химически в соответствующих для промышленного применения растворах и условиях [4]. Режимы импульсного анодирования сплава алюминия АД31 представлены в табл. 1.

Табл. 1. Режимы импульсного анодирования сплава АД31

Соотношение импульса и паузы ($\tau_{и}:\tau_{п}$)	Длительность амплитуды тока, мс				Коэффициент заполнения D	Скважность S
	1	10	50	100		
1:1	1:1	10:10	50:50	100:100	0,5	2
2:1	1:0,5	10:5	50:25	100:50	0,667	1,5
5:1	1:0,2	10:2	50:10	100:20	0,833	1,2
10:1	1:0,1	10:1	50:5	100:10	0,909	1,1

Электролиз проводили при плотности тока 1 А/дм² и температуре электролита 18-21 °С. Длительность электролиза составляла 30 минут. При проведении исследований определяли микротвердость анодных пленок по Виккерсу. Защитную способность измеряли методом капли [5], пробивное напряжение определяли на разработанной на кафедре Х, ТЭХП и МЭТ установке, соответствующей требованиям [5].

При проведении исследования процесса импульсного анодирования сплава алюминия АД31 получены осциллограммы тока и напряжения, представленные на рис. 1.

При скважности импульсов, равной 2, значение амплитуды напряжения процесса возрастает от 8,8 до 10,7 В с увеличением длительности анодного импульса от 1 до 100 мс, что может указывать на инерционность процесса роста пленки (рисунок 1). При коротких импульсах тока образуется тонкий барьерный слой оксида, а роста оксидной пористой части пленки почти не происходит. За время релаксации часть оксида взаимодействует с электролитом, толщина пленки на локальных участках снижается. При подаче следующего импульса процесс образования оксида повторяется, напряжение при этом возрастает и устанавливается вне зависимости от длительности паузы в течение 0,3-0,4 мс.

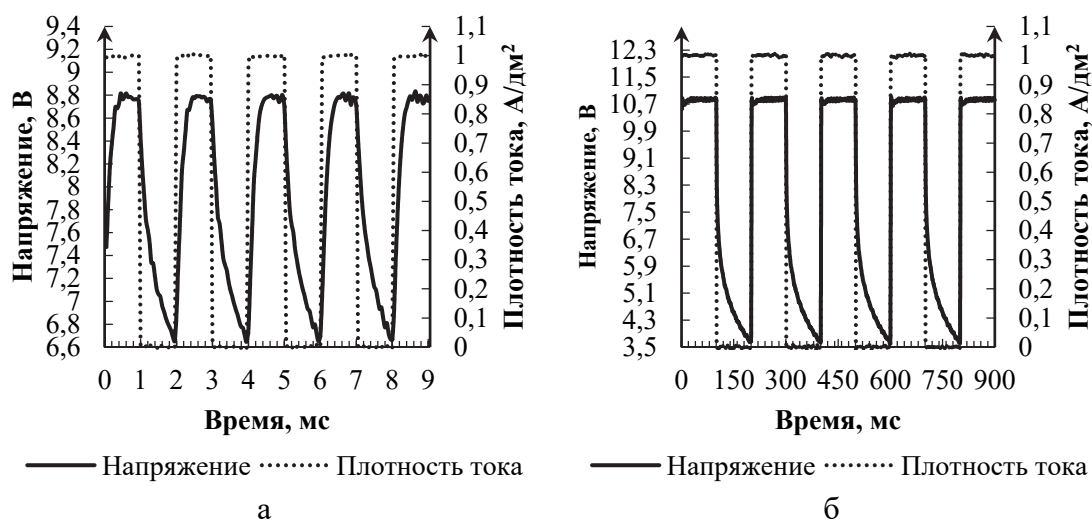
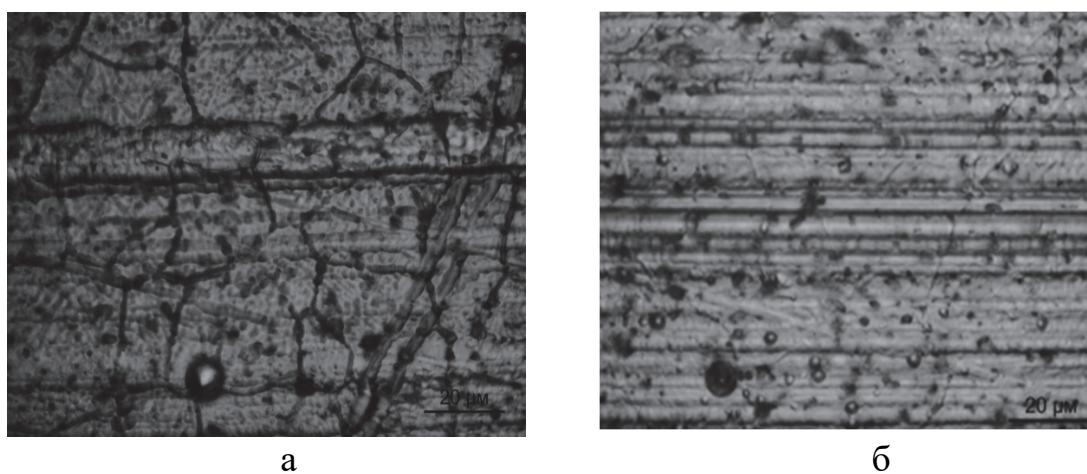


Рис. 1. Осциллограммы тока и напряжения процесса анодирования сплава АД31 в сернокислом электролите при скважности 2

Анодные пленки, осажденные в стационарном режиме, в большинстве случаев, имели сетку трещин (рис. 2а), возникающую вследствие влияния компонентов сплава на процесс образования оксидных покрытий и появления внутренних напряжений в слое оксида.



Параметры импульсного тока: длительность импульса – 1 мс, пауза – 0,1 мс.

Рис. 2 – Микрофотографии поверхности образцов сплава АД31 с, анодированного в стационарном (а) и импульсном (б) режимах

При использовании импульсного гальваностатического режима анодирования происходит увеличение равномерности пленки, уменьшается количество дефектов, пропадают или заполняются микротрещины в оксиде (рисунок 2б), наиболее вероятно, вследствие сокращения времени релаксации и минимизации длительности

безполяризационного взаимодействия свежесформирующегося покрытия с электролитом. Подобная закономерность наблюдается при уменьшении длительностей импульсов тока, что может быть объяснено в дополнении к вышесказанному увеличением общего количества импульсов, способствующего формированию тонких плотных слоев оксида.

Установлено, что применение импульсного режима позволяет увеличить защитную способность и электроизоляционные свойства формируемых анодно-оксидных покрытий по сравнению со стационарным режимом. При уменьшении скважности, и, следовательно, увеличении количества пропущенного электричества от 0,250 (А · ч)/дм² до 0,455 (А · ч)/дм² толщина образующейся оксидной пленки возрастает от 2,9 мкм до 5,5 мкм. Выход по току образования анодной пленки возрастает до 70% и выше с увеличением длительности анодных импульсов при скважностях 1,5-2,0 и практически не изменяется при величинах 1,2-1,1, вследствие сокращения доли бестоковых пауз в процессе импульсного оксидирования и, соответственно, времени взаимодействия электролита с поверхностью образцов без поляризации. Пробивное напряжение анодных пленок, сформированных при исследованных скважностях, достигает максимальных значений 260 В при длительности импульса 10 мс. Это может говорить о том, что при указанной длительности происходит формирование плотных и равномерных слоев анодного оксида. Наиболее вероятно при более коротких импульсах оксид формируется на локальных участках с постепенным заполнением всей поверхности в последующих импульсах. Увеличение длительности импульса более 10 мс приводит к разрыхлению пленки, вследствие локального разогрева поверхности и интенсификации точечных химических реакций оксида с электролитом.

Таким образом, использование импульсного режима анодирования позволяет повысить электроизоляционные и защитные свойства анодных покрытий на поверхности сплава алюминия АД31 до 30 % и более по сравнению со стационарным режимом электролиза. Наиболее высокие значения указанных показателей соответствуют импульсному режиму с длительностью импульсов 10 мс и скважностью процесса 1.1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудрявцев, Н. Т. Электролитические покрытия металлами. / Кудрявцев, Н. Т. – М.: Химия. – 1979. – 352 с.
2. Захаров, Я. А. Морфология анодного оксида алюминия и методы ее модификации / Я. А. Захаров, А. Н. Плиговка, А. А. Позняк //

НАНБ. Порошковая металлургия. Физико-химические исследования материалов. – 2021. – № 43. – С.106-115.

3. Медведева, Н. В. Модулирование пор анодного оксида алюминия в процессе его получения для формирования фотонных кристаллов / Н. В. Медведева // Вестник БГУИР. Электронные системы и технологии. – 2021. – С.216-218.

4. Грилихес, С. Я. Оксидирование и фосфатирование металлов/ С. Я. Грилихес. – 3-е изд. – Ленинград: Машиностроение, 1971. – 117 с.

5. Аверьянов Е. Е. Справочник по анодированию. — М.: Машиностроение. – 1988. – 224 с.

УДК 621.793.182

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДАМИ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ОСАЖДЕНИЯ

С.Д. ЛАТУШКИНА¹, Д.Д. ГОРДИЕНКО², Д.В. КУИС²,
И.А. СЕЧКО¹, А.А. ЧАЙКИН¹

¹ Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь

² Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

При создании функциональных покрытий различного назначения, способных удовлетворять зачастую противоречивым требованиям, наиболее перспективной является концепция многослойной архитектуры покрытий. Многослойная архитектура позволяет создавать покрытия, одновременно включающие метастабильные и многокомпонентные материалы в едином геометрическом теле, и таким образом даёт возможность сочетать различные концепции отдельных слоёв в многослойном покрытии. В составе покрытий необходимо наличие пластичных фаз, осуществляющих релаксацию внутренних напряжений и подавление роста зародышевых трещин.

Каждый из слоёв многослойно-композиционного покрытия может иметь как монослойную, так и многослойную архитектуру. Слоистая архитектура покрытий наноразмерной толщины позволяет стабилизировать определенную текстуру каждого слоя покрытия и создавать материалы для покрытий нового типа. Наноструктурированные многослойные покрытия можно классифицировать следующим образом[1]:

- стандартные износостойкие покрытия, имеющие многослойную архитектуру, из материалов с одинаковыми химическими связями и структурой;

- многослойные покрытия из материалов с сильным отличием химических связей и структуры;

- многослойные покрытия, имеющие слои с внутренними граничными промежуточными подслоями нанометровой толщины.

С помощью многослойных покрытий с наноразмерной толщиной каждого из слоёв можно активизировать различные виды процессов поглощения энергии, что при оптимальной архитектуре и структуре покрытия приводит к повышению вязкости и прочности материала покрытия лишь при незначительном снижении твёрдости (обеспечение сбалансированного соотношения твердость–вязкость).

Появление на рынке технологических установок, оснащенных несколькими испарителями и/или магнетронами и обеспечивающими получение многослойных покрытий в одном вакуумном цикле, стимулировало проведение соответствующих исследований.

В настоящей работе была предложена концепция чередования слоев со столбчатой структурой (TiN) и слоев с наноразмерной структурой (TiAlCrNi)N в составе многослойного покрытия, что должно привести к повышению физико-механических свойств формируемого покрытия за счет увеличения протяженности межфазных границ, как между слоями, так и в слое с наноразмерной структурой.

Получение покрытий осуществлялось на вакуумной установке нанесения упрочняющих покрытий 01ИН-6-008, оснащенной системой магнитной сепарации плазменного потока. Осаждение слоев покрытий проводилось как в среде азота ($P=0,04$ Па), так и углекислого газа ($P=0,04$ Па). Толщина многослойного покрытия составляла $600,0 \pm 10,0$ нм без учета постоянной для всех экспериментов толщины подслоя титана 100 нм.

Одним из определяющих условий долговременной эксплуатации деталей и инструмента является высокая адгезионная прочность покрытия к подложке. Основное влияние на величину адгезионной прочности оказывают физико-химические процессы, происходящие на границе раздела покрытие–подложка. К ним относятся химическое взаимодействие и механическое зацепление, адсорбция молекул на границе раздела фаз, взаимная диффузия молекул контактирующих тел и другие.

Для определения адгезии осажденных покрытий применяли скретч-тестер REVETEST (CSM Instruments). В качестве индентора использовался алмаз конической формы с радиусом закругления при вершине 0,2 мм. Момент адгезионного и когезионного разрушения фиксировался

после испытаний с помощью оптического микроскопа, а также по изменению акустической эмиссии: $Lc1$ – момент появления первой трещины; $Lc3$ – отслаивание участка покрытия (адгезионное разрушение).

Исследования показали, что покрытия $\text{TiN}-(\text{TiAlCrNi})\text{N}-\text{TiN}-(\text{TiAlCrNi})\text{N}$ и $\text{TiN}-(\text{TiAlCrNi})\text{N}-\text{Ti}-(\text{TiAlCrNi})\text{CO}$ разрушаются вследствие пластической деформации и образования усталостных трещин в материале покрытия (рис.1).

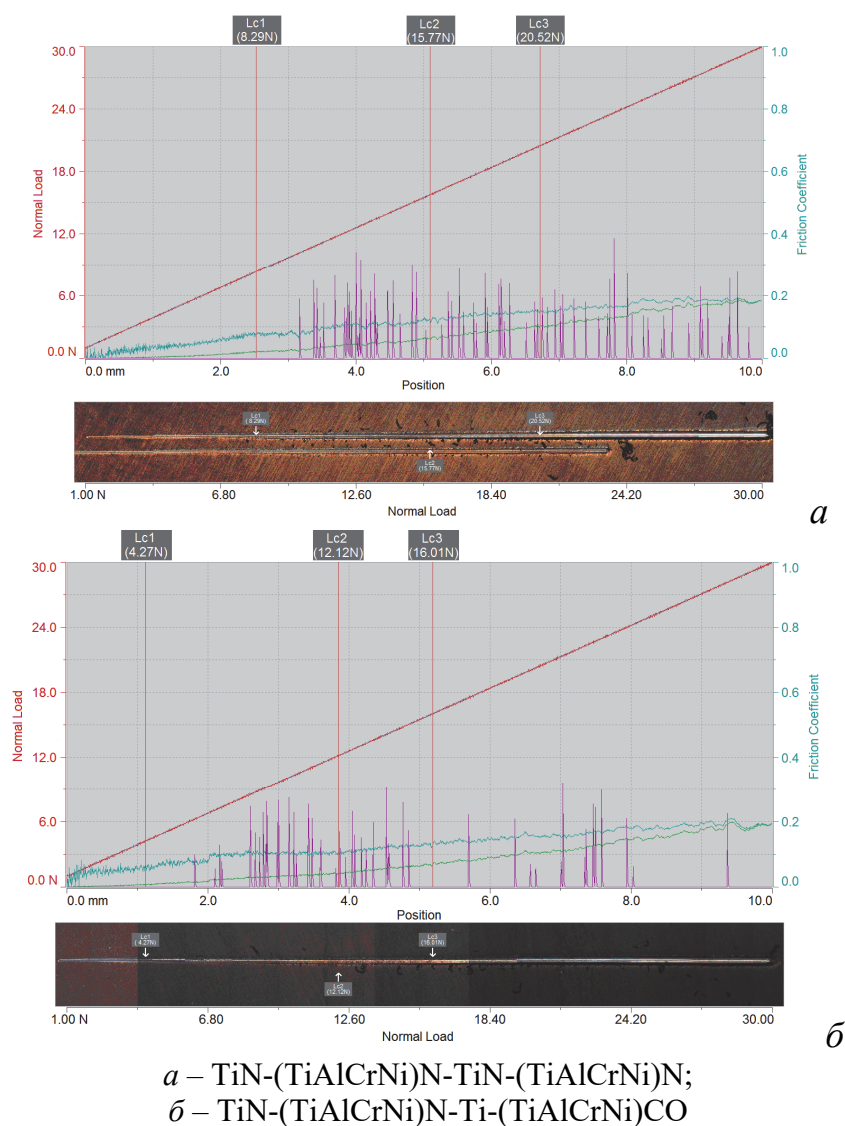


Рис. 1. Адгезионная прочность многослойных покрытий

Установлено, что для покрытий $\text{TiN}-(\text{TiAlCrNi})\text{N}-\text{TiN}-\text{TiAlCrNi}\text{N}$ характерны высокие значения адгезионной прочности ($Lc = 20,52$ Н). Покрытия, в которых присутствует слой, сформированный в среде углекислого газа $\text{Ti}-(\text{TiAlCrNi})\text{CO}$, имеют меньшую адгезионную прочность, чем нитридные покрытия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Многокомпонентные нанокompозитные покрытия с адаптивным поведением в поверхностной инженерии/ Погребняк А.Д. [и др.]// Успехи физических наук. 2017. Том 187, №6. Стр. 629-652.

УДК 621.74.042

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ЛИТЬЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГЕТЕРОФАЗНОЙ ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННОЙ СТАЛИ

С.Н. ЛЕЖНЕВ¹, И.В. ЧУМАНОВ², А.Н. АНИКЕЕВ², Д.В. КУИС³,
П.Л. ЦЫБА⁴, А.С. АРБУЗ⁵, С.Л. КУЗЬМИН¹, В.В. ЧИГИРИНСКИЙ¹

¹Рудненский индустриальный университет,
Рудный, Казахстан

²Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия

³Белорусский государственный технологический университет,
Минск, Беларусь

⁴Карагандинский индустриальный университет,
Темиртау, Казахстан

⁵Назарбаев Университет,
Астана, Казахстан

Развитие такой стратегической отрасли, как военно-космическая отрасль, включающей в себя такое направление производства как применения беспилотной техники, в т.ч. беспилотных летательных, наземных и водных аппаратов, наноспутников, наравне с горно-металлургической и машиностроительной отраслью становится приоритетом для нашей страны. Обеспечение этих отраслей современными материалами с самыми различными функциональными свойствами в настоящее время в большинстве случаев осуществляется из-за рубежа, поскольку отечественные предприятия, работающие в данной отрасли, до сих пор еще руководствуются советской концепцией конструирования материалов. Эта концепция была целесообразна в то время и подразумевала обеспечение необходимых свойств материалов за счет применения дефицитных, дорогостоящих материалов без оглядки на их количество и рыночную стоимость. Современный мир диктует необходимость

менять парадигму мышления и разрабатывать рациональные технологии конструирования материалов, обеспечивающие необходимые свойства только в тех объемах изделия, которые непосредственно подвергаются нагрузкам.

Традиционно, повышение механических свойств черных металлов и сплавов достигается за счет введения в состав металла (основа железо) или сплава значительного количества легирующих элементов. В настоящее время существующих марочных композиций более чем достаточно, чтобы решать большинство текущих задач промышленности. В тоже время, анализ рынка стоимости на легирующие элементы показал, что с каждым годом цены на ферросплавы (легирующие композиции) увеличиваются. Альтернативой использованию дорогостоящих легирующих элементов могут служить гетерофазных дисперсно-армированные стали с невыраженной границей раздела слоев, полученные технологией инжестирования ультрадисперсных частиц в кристаллизующийся расплав с целью получения градиентных механических характеристик. Такие стали являются представителями современных материалов, поскольку в технологии их создания реализуется механизм рационального конструирования и обеспечения необходимыми свойствами только тех объемов, которые подвергаются воздействиям именно теми свойствами, которые требуются от данного объема.

По этой причине весьма актуальной задачей является разработка технологии получения металлов, отвечающих специфическим запросам существующей промышленности и при этом имеющих сравнительно низкую себестоимость.

Существующие технологии получения градиентных материалов можно условно разделить на две большие группы:

1. Материалы основаны на соединении разнородных материалов (пакетирование, прокатка, наплавка, напайка, аддитивные технологии и т.д.) [1]. У таких способов есть существенные недостатки: требуется сложное оборудование, а также наличие переходной зоны между материалами, участки не сваривания, концентрационные неоднородности являющейся концентратором напряжений, являющейся наиболее частой причиной выхода изделия из строя.

2. Материалы, полученные технологией спекания порошков, последовательно набранных в одну пресс-форму изделие и отличающиеся по стехиометрическому составу [2]. Такая технология обеспечивает получения градиента свойств, однако он незначителен, а сама технология очень трудоемка, затратна и главным недостатком технологии является невозможность получения деталей объемом более 15-20 кубических сантиметров - большой размер практически невозможно качественно пропрессовать.

Наиболее перспективным направлением создания материалов с высоким уровнем свойств, по нашему мнению, является микроструктурирование материалов методом инжeksiрования требуемых по морфологии ультрадисперсных частиц в кристаллизующийся расплав, что дает возможность получать гетерогенные градиентные дисперсно-армированные стали с невыраженной границей раздела слоев. При этом, по нашему мнению, наиболее перспективным методом инжeksiрования ультрадисперсных частиц в кристаллизующийся расплав является введение частиц при центробежном литье. Особенность сталей, полученных таким способом, состоит в том, что вводимые ультрадисперсные микрочастицы встраиваются в кристаллическую решетку формируемого материала, увеличивая количество центров кристаллизации, что ведет к значительному увеличению механических свойств, увеличивают его удельную плотность (за счет измельчения структуры), обеспечивают более мелкое зерно, что ведет к увеличению коррозионно-стойких свойств, приносят свойства, характерные для вводимых частиц тем объемам материала, где они располагаются. Расположением инжeksiруемых в расплав в ультрадисперсных частиц можно управлять, что позволяет прогнозировать и задавать различные свойства различным объемам получаемой стали.

Сущность же самого метода инжeksiрования ультрадисперсных частиц в кристаллизующийся расплав при центробежном литье заключается в следующем: при заливке металлического материала на машину центробежного литья на поток металла непрерывно, в течение всей процедуры разлива, подаются твердые тугоплавкие мелкодисперсные частицы различной плотности. Когда плотность тугоплавкой дисперсной частицы, погруженной в расплав, отличается от плотности самого расплава, сила, действующая на эту частицу, не компенсируется ни ее собственной центробежной силой, ни силой тяжести. Вследствие этого создаются условия для перемещения частиц либо внутрь, либо наружу формирующегося изделия, то есть к внутренней или внешней поверхности заготовки. Как только частица достигает фронта кристаллизации, она прижимается расплавленным металлом к этому фронту и перестает всплывать, будучи захваченной растущими дендритами. В итоге происходит упрочнение поверхности.

Чтобы укрепить наружную поверхность трубной заготовки, используются тугоплавкие дисперсные частицы, чья плотность превышает плотность расплава. В таком случае центробежная сила превосходит силу Архимеда, и частица в расплавленном материале движется от оси вращения к фронту кристаллизации. Она прижимается расплавом к фронту кристаллизации, не всплывает и захватывается растущими

дендритами, что приводит к укреплению наружной поверхности трубной заготовки. Для укрепления внутренней поверхности трубной заготовки применяются тугоплавкие дисперсные частицы, плотность которых меньше плотности расплава. Здесь сила Архимеда доминирует над центробежной силой, и частица в расплаве направляется к оси вращения, всплывая на свободную поверхность расплава и захватываясь растущими дендритами. Это приводит к усилению внутренней поверхности трубной заготовки.

Для одновременного усиления как внешней, так и внутренней поверхностей трубной заготовки используются частицы разной плотности (как большей, так и меньшей, чем плотность расплава), подаваемые в смесь одновременно. После попадания в изложницу, под влиянием центробежных сил и силы Архимеда всплытия, частицы разделяются, обеспечивая одновременное дисперсное упрочнение как внутренней, так и внешней поверхности трубной заготовки (рис. 1).

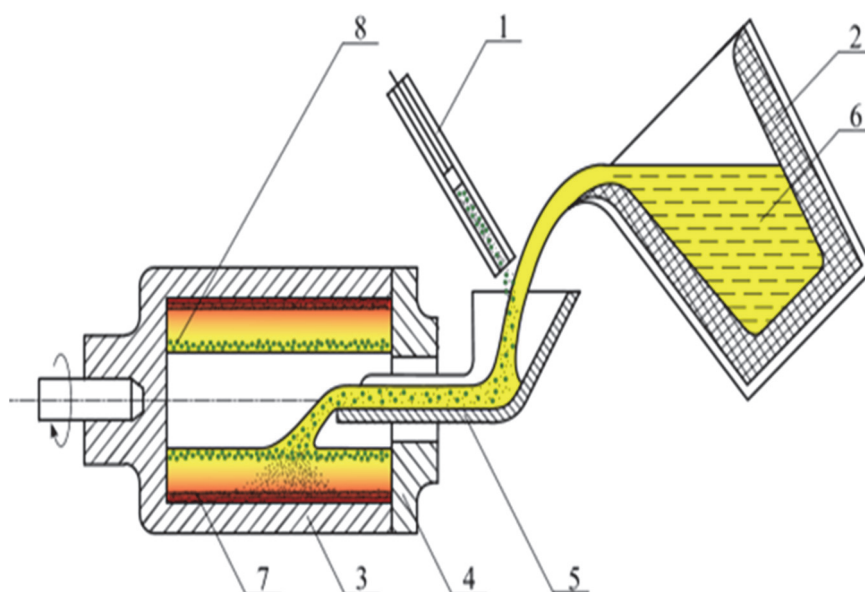


Рис. 1. Способ получения градиентного материала

1 – дозатор; 2 – ковш; 3 – горизонтальная изложница; 4 – крышка изложницы; 5 – сталеразливочный носок; 6 – упрочняемый расплав; 7 – карбиды с удельной плотностью равной или выше плотности металла; 8 – карбиды с удельной плотностью меньшей плотности металла.

На основе выше представленной информации можно сделать вывод, что количество, дисперсность, различная плотность, возможность варьировать скоростью вращения горизонтальной изложницы, а также огромное многообразие твердых тугоплавких мелкодисперсных частиц, и, как следствие, многообразие физико-химических и

механических свойств создают предпосылки для получения новых градиентных материалов.

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № AP23485709).

ЛИТЕРАТУРА

1. Al-Mangour B., Grzesiak D., Yang J.-M. In-situ formation of novel TiC-particle-reinforced 316L stainless steel bulk-form composites by selective laser melting. Journal of Alloys and Compounds. 2017. Vol. 706. P. 409-418.

2. Levy A., Miriyev A., Elliott A., Suresh Babu S., Frage N. Additive manufacturing of complex-shaped graded TiC/steel composites. Materials & Design. 2017. Vol.118, P. 198-203.

УДК 678.8

ПРИМЕНЕНИЕ АУКСЕТИКОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ КРЫЛА С ИЗМЕНЯЕМОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ

А.Г. ЛЮБИМОВ, Н.Р. ПРОКОПЧУК, В.О. ГОВОРОВСКИЙ
Белорусский государственный технологический университет
ЗАО «Беспилотные летательные аппараты»
Минск, Беларусь

Крыло является основным несущим элементом беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Оно выполняет сразу несколько критически важных функций: создаёт подъёмную силу, определяет аэродинамическое качество, обеспечивает устойчивость в полёте, а также служит конструктивной платформой для размещения оборудования. Традиционные крылья проектируются под определённый режим полёта (чаще всего крейсерский), что обеспечивает оптимальные характеристики только в узком диапазоне условий.

При изменении скорости или угла атаки эффективность таких крыльев снижается: растёт аэродинамическое сопротивление, ухудшается манёвренность и падает устойчивость. Для частичной компенсации этих ограничений используются механизированные поверхности – закрылки, предкрылки, элероны. Однако они вносят дополнительные

недостатки: увеличивают массу, усложняют конструкцию, создают щели и разрывы обшивки, которые вызывают турбулентность и снижают аэродинамическое качество.

В связи с этим возникает необходимость в разработке морфинг-крыльев, способных адаптировать геометрию в полёте. Одним из наиболее перспективных подходов к созданию таких конструкций являются ауксетические метаматериалы – структуры с отрицательным коэффициентом Пуассона. В отличие от обычных материалов, которые при растяжении сужаются поперёк, ауксетики при растяжении расширяются, обеспечивая уникальное сочетание деформируемости и прочности [1].

На рис. 1 приведено схематически поведение обычного и ауксетического материала при растяжении (отрицательный коэффициент Пуассона).

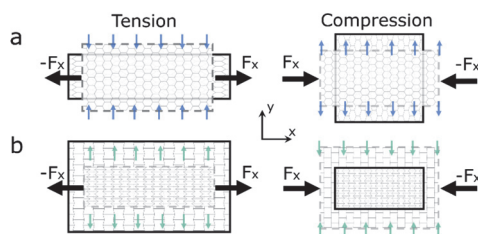


Рис. 1 – Сравнение поведения обычного и ауксетического материала при растяжении (отрицательный коэффициент Пуассона) [1]

Главное свойство ауксетики – способность изменять геометрию под нагрузкой так, что материал расширяется в поперечном направлении при растяжении и сужается при сжатии. Это открывает ряд преимуществ для авиационных конструкций:

- управляемая деформация профиля – возможность плавно изменять кривизну крыла без применения сложной механизации;
- повышенная энергоёмкость – способность аккумулировать и рассеивать значительные объёмы энергии при ударе или вибрации;
- снижение массы конструкции – отказ от тяжёлых приводов и упрощение внутренней архитектуры крыла;
- устойчивость к повреждениям – перераспределение напряжений по поверхности, что повышает надёжность конструкции.

Ауксетики могут изготавливаться в виде различных ячеистых структур: re-entrant honeycomb, chiral-соты, перфорированные пластины и др. [1]. Каждая из конфигураций имеет свои механические и аэродинамические особенности, что позволяет выбирать оптимальное решение под конкретные условия полёта.

На рисунке 2 показаны примеры ауксетических ячеек (re-entrant, chiral и др.), используемых в морфинг-конструкциях

Одним из ключевых направлений является включение ауксетических сердечников в состав сотовых панелей крыла. Это позволяет изменить геометрию профиля без применения сложных приводов.

В работе Rudresh et al. (2024) рассмотрена модель крыла Eppler-420 с ауксетическим наполнителем. Численные расчёты показали, что такая конструкция повышает резонансные частоты крыла и увеличивает прогиб задней кромки без потери прочности (рисунок 2) [3].

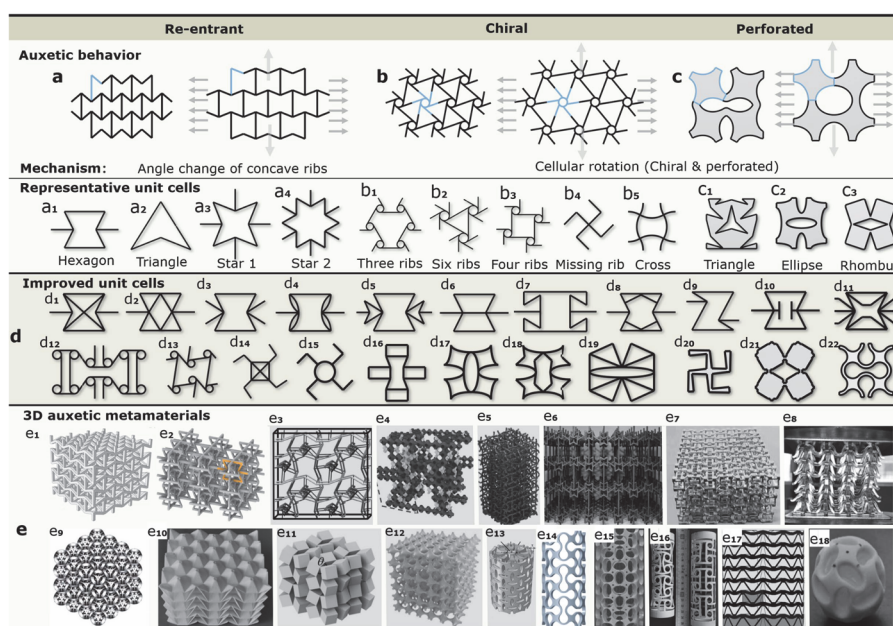


Рис. 2 – Примеры ауксетических ячеек (re-entrant, chiral и др.), используемых в морфинг-конструкциях [1]

Это доказывает, что ауксетики могут заменить классические механизированные элементы и при этом улучшить устойчивость к флаттеру.

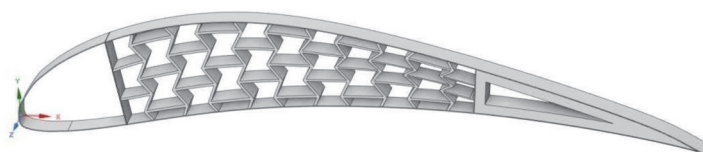


Рис. 3 – Геометрия крыла Eppler-420 с интегрированным ауксетическим сердечником для повышения жёсткости и устойчивости к флаттеру [3]

Ведущая кромка крыла является одной из наиболее уязвимых частей конструкции. При столкновении с птицами или другими объектами она должна сохранять целостность, иначе возникает риск разрушения крыла.

В работе Zhao и соавт. (2025) предложена Arc-Z-образная ауксетическая ячеистая структура для использования в обшивке передней кромки крыла. Численное моделирование удара птицы на скорости

около 125 м/с показало, что применение такой структуры снижает максимальные деформации примерно на 25% по сравнению с традиционными сотовыми заполнителями (рисунок 4) [4].

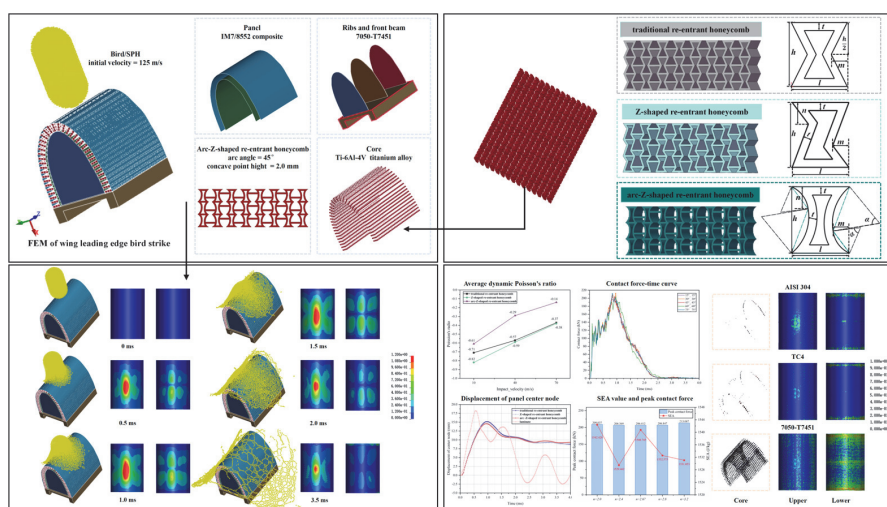


Рис. 4 – Моделирование удара птицы в переднюю кромку крыла с применением Arc-Z-образной ауксетической структуры, сравнение с традиционными сотовыми заполнителями [4].

Таким образом, ауксетики не только обеспечивают морфинг, но и повышают живучесть крыла при экстремальных нагрузках.

Развитие ауксетических материалов идёт по пути интеграции с новыми технологиями:

- интеллектуальные структуры с эффектом shape memory, способные восстанавливаться после деформаций;
- био-вдохновлённые ячейки, копирующие природные геометрии и обладающие многоступенчатой жёсткостью [5];
- использование аддитивных технологий, позволяющих создавать сложные 3D-конфигурации ячеек.

Эти направления делают ауксетики особенно перспективными для применения в авиации, где требуется совмещать лёгкость, адаптивность и прочность. Ауксетические структуры открывают новые возможности для проектирования морфинг-крыльев. Они позволяют:

- изменять профиль крыла без сложной механизации;
- снижать массу конструкции;
- повышать устойчивость к флаттеру и динамическим нагрузкам;
- обеспечивать защиту leading edge от ударов.

Таким образом, ауксетические метаматериалы могут стать основой для разработки крыльев нового поколения, объединяющих адаптивность, энергоэффективность и высокую прочность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wang Y., Guo Y., Yang H. Mechanical properties of re-entrant hybrid honeycomb structures for morphing wings // *Biomimetics*. – 2024. – Vol. 9, no. 11. – P. 521. <https://doi.org/10.3390/biomimetics9110521>
2. Zhang Y., et al. Recent advances of auxetic metamaterials in smart materials and structural systems // *Materials & Design*. – 2025. – Vol. 250. – P. 112874. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.112874>
3. Rudresh M., Prashanth K.P., Praveen Kumar M.V., Ravikumar M., Sivambika S. Flutter control of aircraft wing using auxetic structures // *Thin-Walled Structures*. – 2024. – Vol. 210. – P. 111937. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.111937>
4. Zhao Y., et al. Arc-Z re-entrant honeycomb sandwich panels with rotational deformation mechanism for leading edge structures // *Composite Structures*. – 2025. – Vol. 335. – P. 118782. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2025.118782>
5. Hamzehei R., Bodaghi M., Wu N. Bio-inspired design and 4D printing of multi-stiffness wavy metamaterial energy absorbers/dissipators with shape recovery features // *Engineering Structures*. – 2025. – Vol. 327. – P. 119538. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.119538>

УДК 678.8

ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ АУКСЕТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ В КОНСТРУКЦИИ БПЛА

А.Г. ЛЮБИМОВ, О.М. КАСПЕРОВИЧ,
Л.А. ЛЕНАРТОВИЧ, А.Ф. ПЕТРУШЕНЯ

Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

Перспективы применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкциях беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) весьма многообещающие благодаря ряду преимуществ, которые обеспечивают значительное улучшение характеристик БПЛА. Полимерные композиционные материалы имеют значительно меньшую плотность по сравнению с традиционными материалами (алюминиевыми сплавами и сталью). Это позволяет снизить массу конструкций БПЛА, сохраняя при этом необходимую жесткость и прочность. Например, углепластики обладают прочностью на уровне титана и

стали, при массе всего около четверти металла. Композитные материалы устойчивы к коррозии, воздействию агрессивных сред и ультрафиолетового излучения. Благодаря этому существенно увеличивается срок службы элементов конструкции, особенно критичных для эксплуатации в экстремальных условиях.

Современные технологии производства позволяют создавать детали сложной формы и геометрии непосредственно из полимерных материалов с волокнистым наполнителем, обеспечивая точное соответствие проектируемым аэродинамическим характеристикам. Благодаря своей структуре и составу, полимерные композиты способны эффективно поглощать энергию удара и вибрации, снижая вероятность повреждений при аварийных ситуациях и увеличивая ресурс аппаратуры. Многие виды полимерных композитов демонстрируют высокую температуростойкость, позволяя применять их в зонах двигателей, воздухозаборников и теплонагруженных участках конструкции. Использование легких и прочных композитных крыльев позволяет повысить грузоподъемность аппарата, уменьшить сопротивление воздуха и увеличить дальность полета. Такие крылья часто используются в современных военных дронах типа «Bayraktar TB2» и гражданских моделях вроде DJI Mavic Pro.

Применение полимерных композитов для изготовления корпусов электродвигателей снижает вес, увеличивая массу полезной нагрузки. Аналогично применение лёгких пластиковых каркасов для аккумуляторных батарей помогает минимизировать общий вес и оптимизировать конструкцию батареи.

Некоторые типы композитных материалов прозрачны для электромагнитных волн, что делает их незаменимыми для радиоантенн и датчиков, установленных на корпусе дронов.

Несмотря на очевидные плюсы, существуют некоторые трудности и ограничения, связанные с внедрением полимерных композитов в авиационную промышленность:

- высокая стоимость материалов и сложность технологий изготовления требуют значительных инвестиций;
- большая доля ручного труда;
- необходимость специальных производственных условий (например, автоклавов высокого давления);
- проблемы с повторной переработкой отходов композитов;
- недостаточная стандартизация процессов контроля качества и испытаний деталей из композитов.

Еще одним перспективным направлением в проектировании БПЛА является создание крыльев с изменяемой геометрией (морфинг-крыльев)

(рис. 1). В отличие от традиционных жёстких конструкций с ограниченными возможностями управления, морфинг-крылья обеспечивают гибкие изменения формы без использования жёстких рулевых структур. Это позволяет более точно настраивать аэродинамические характеристики самолёта в реальном времени, улучшая управляемость и эффективность полёта [1].

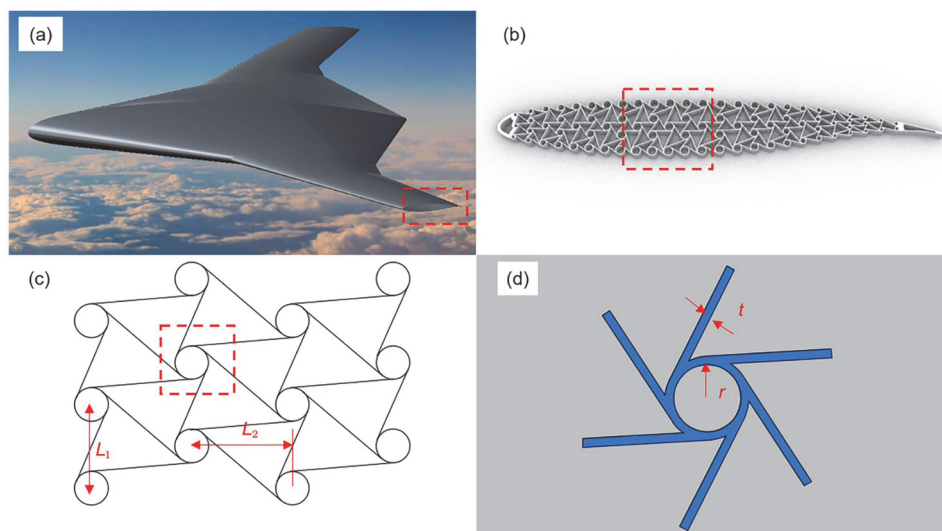


Рис. 1. Оптимизация хиральных решёток с помощью генетических алгоритмов, подтвержденная 3D-печатными образцами

Институт исследования прочности авиационных конструкций Китая (подразделение AVIC) успешно завершил теоретическую проверку полностью решётчатой распределённой структуры морфинг-крыла на основе механических метаматериалов. Исследование посвящено разработке и анализу крыла самолёта с использованием специальных ауксетических структур (имеющих отрицательный коэффициент Пуассона), которые позволяют менять форму крыла (морфинг) под действием внешних нагрузок. В работе рассматриваются два типа ауксетических структур: Re-entrant («вогнутые») (рис. 2, а) и S-образные (рис. 2, б) [2].

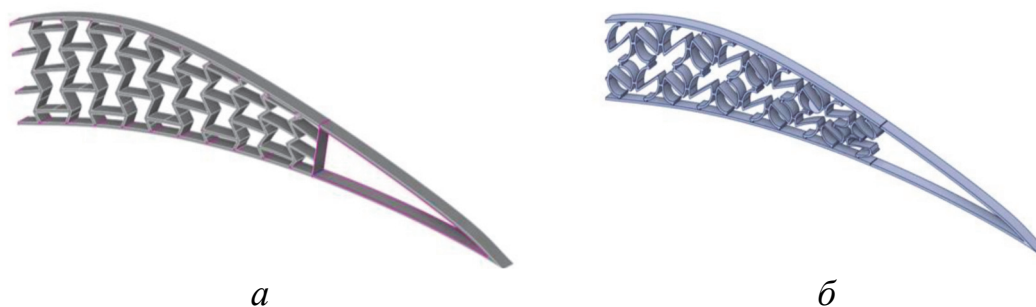


Рис. 2. Различные ауксетические структуры в морфинг-крыльях

Статический анализ отдельных ауксетических структур показал, что структура типа Re-entrant имеет меньшие максимальные напряжения и большую гибкость, чем S-образная структура.

Базируясь на приведенных выше работах, на кафедре полимерных композиционных материалов и кафедре механики и конструирования проводятся исследования, связанные с исследованием фундаментальных свойств ауксетических материалов «вогнутого» типа. Исследования направлены на определение поведения механических метаматериалов, полученных аддитивными технологиями, с различной геометрией ячейки, соотношением размеров элементов ячейки и из различных термопластичных материалов, при квазистатическом сжатии и воздействии ударных нагрузок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zheng Q., Zhu W., Zhi Q., Sun H., Li D., Ding X. Genetic algorithm optimization design of gradient conformal chiral metamaterials and 3D printing verification for morphing wings // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. – 2024. – Vol. 37, no 1, <https://doi.org/10.1186/s10033-024-01132-3>.

2. Shatindra B., Navalgund S. V., Tejas C C; Chindi R. V., Dr. Hareesha N.G. Aircraft wing morphing using Auxetic Structures // *International Journal of Innovative Science and Research Technology (IJISRT)*. – 2024. – Vol. 9, Issue 5. – P. 526–555, <https://doi.org/10.38124/ijisrt/ijisrt24may1201>.

УДК 678.6

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ: НОВЫЕ ЭПОКСИДНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А.С. ЛЮБИМОВА, Н.С. ПЕТРОВ
ООО «Композит Изделия»

Снижение массы без механических потерь является наиболее актуальной задачей в производстве беспилотных летательных аппаратов, поэтому производство беспилотных летательных аппаратов сложно представить без полимерных композиционных материалов (ПКМ).

В основе ПКМ лежит полимерная матрица, может быть, как на основе термопластичных, так и на основе термореактивных полимеров.

Каждый класс имеет свои достоинства и недостатки, однако наиболее частое применение при производстве ПКМ нашли термореактивные связующие.

Одним из наиболее актуальным направлением развития ПКМ для БПЛА, является создание новых эпоксидных систем, а именно: эпоксидные связующие, эпоксидные наполнители, эпоксидные клеи.[1]

Разработка эпоксидного на доступной сырьевой базе, является одним из перспективных направлений для композитной отрасли, как по причине ухода многих производителей из недружественных стран, так и по причинам незначительного количества отечественных производителей на территории России и СНГ. Также эпоксидные смолы позволяют получить недорогие системы с высокими физико-механическими характеристиками, клеи с хорошей адгезией и другое.[2]

Материалы и методы

Предмет исследования – эпоксидные связующие «Резикарб-ЭП», «Резикарб-Аэро». Температуру и продолжительность отверждения связующего подбирали по разным режимам. Рекомендуемым режимом считается выдержка до формообразования при комнатной температуре (для достижения лучшего результата в течение 24 ч при 25°C), а затем отверждение при 60, 80 и 120°C, пока связующее не наберет максимальные характеристики.

Температуру стеклования отвержденных образцов измеряли в соответствии с ГОСТ 56753-2015 при скорости нагрева 5°C/мин. Проводили испытания образцов размером 50×10×4 мм на термоанализаторе динамическо-механической модификации DMA 242 E фирмы Netzsch.

Тепловой эффект реакции определяли методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на дифференциальном сканирующем калориметре марки Netzsch (Германия) с интервалом рабочих температур от -100 до +400°C и диапазоном скоростей нагрева от 1 до 5°C/мин. Испытания проводили в соответствии с ГОСТ Р 55134-2012.

Вязкость образцов связующих Резикарб ЭП и Резикарб-Аэро измеряли в соответствии с ГОСТ 25271–93 на вискозиметре Брукфильда марки DV2TLV при комнатной температуре.

Прочность при изгибе определяли на испытательной машине по ГОСТ 4648–2014 при комнатной температуре. Испытание проводили при скорости 2 мм/мин на образцах размером 80×10×4 мм, расстояние между опорами составляло 60 мм.

Прочность при растяжении определяли на испытательной машине по ГОСТ 11262—2017. Испытание проводили при скорости 2 мм/мин.

Результаты и обсуждение

Были разработаны на основе отечественной компонентной базы эпоксидные связующие Резикарб-ЭП и Резикарб-Аэро, подходящие для получения ПКМ методами вакуумной инфузии и ручного формования. Технологические параметры связующих представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1.

Параметр	«Резикарб ЭП-Б»	«Резикарб ЭП-С»	«Резикарб ЭП-М»
Соотношение смешивание, масс.ч.	100:25	100:30	100:25
Вязкость не более, мПа*с	800	500	400
Время жизни, мин.	30-40	40-50	150-210
Рекомендованный режим отверждения*	- 24 ч. при 25 °С - 5 ч при 80 °С	- 24 ч. при 25 °С - 5 ч при 80 °С	- 24 ч. при 25 °С - 5 ч при 80 °С
*Возможен ускоренный режим отверждения при повышенных температурах			

Таблица 2

Параметр	«Резикарб Аэро-Б»	«Резикарб Аэро-С»	«Резикарб Аэро-М»
Соотношение смешивание, масс.ч.	100:30	100:30	100:30
Вязкость не более, мПа*с	400-500	400-500	550-650
Время жизни, мин.	50	90-120	180-240
Рекомендованный режим отверждения*	25 °С – 24 ч, +постотверждение при 80 °С – 10 ч или при 60 °С – 15 ч	25°С – 24 ч, +постотверждение при 80 °С – 10 ч или при 60 °С – 15 ч	25 °С – 24 ч, +постотверждение при 80 °С – 10 ч или при 60 °С – 15 ч
*Возможен ускоренный режим отверждения при повышенных температурах			

Комплектация модифицированной эпоксидной основы комбинированными отвердителями, различающимися по времени гелеобразования (на среднем, быстром и медленном) позволяет варьировать время технологического процесса и свойства конечных изделий. А смешение отвердителей в определенных пропорциях ЭП-Б и ЭП-М позволяет

подбирать различное (от 30 минут до 3 часов) технологическое окно, необходимое под конкретные задачи.

Зарубежными аналогами Резикарб-ЭП и Резикарб-Аэро являются системы L (R&G) и LR285 (Hexion). Сравнительные характеристики представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3.

-	LR285+ LH285	Аэро-Б	LR285+ LH286	Аэро-С	LR285+ LH287	Аэро-М
Вязкость, мПа*с	Не менее 600	Не более 400-500	Не менее 600	Не более 400-500	Не менее 600	Не более 500-650
Время жизни, мин.	40-50	40-50	90-100	90-120	180-240	180-240
Рекомендо- ванный режим отверждения	24 ч при 25 °С + 15 ч при 80 °С	24 ч при 25 °С +10 ч при 80°С	24 ч при 25 °С + 15 ч при 80 °С	24ч при 25 °С +10 ч при 80°С	24 ч при 25 °С + 15 ч при 80°С	24ч при 25 °С +10 ч при 80°С
Температура стеклования, не менее	80-90°С	90- 100°С	80-90°С	80-90°С	80-90°С	90-100 °С
Разрушающее напряжение на растяже- ние, МПа	70-80	65-75	70-80	60-65	70-80	75-80
Модуль упру- гости, ГПа	3,0-3,3	3,4	3,0-3,3	3,3	3,0-3,3	3,15
Прочность на изгиб, Мпа	110-120	120-125	110-120	115-125	110-120	130-135
Модуль упру- гости, МПа	-	3400	-	3390	-	3100
Степень от- верждения, ДСК, %	-	99	-	99	-	99

Таблица 4.

-	L+GL1	ЭП-Б	L+L	ЭП-С	L+GL2	ЭП-М
Вязкость, мПа*с	820	600-700	580±10 0	450-500	249	250-300
Время жизни, мин.	30	30-40	40	40-50	210	150-210
Рекомендованный режим отверждения	24ч при 25°C +15ч при 70°C	24ч при 25°C +5ч при 80°C или 8ч при 60°C	24ч при 25°C +15ч при 70°C	24ч при 25°C +5ч при 80°C или 8ч при 60°C	24ч при 25°C +15ч при 70°C	24ч при 25°C +5ч при 80°C
Температура стеклования, не менее	80°C	80°C	60°C	80°C	85°C	95 °C
Разрушающее напряжение на растяжение, МПа	74	60-70	69	60-70	74,8	65-75
Модуль упругости, ГПа	3,5	3,5-3,7	2,95	3,5-3,7	4,0	3,5-3,7
Прочность на изгиб, Мпа	135	100-110	110	138	119	143
Модуль упругости, МПа	3500	3900	2950	3750	3050	3740

Как видно из данных табл. 3 и 4, связующие Резикарб-ЭП и Резикарб-Аэро по сравнению с зарубежными аналогами не уступает по технологическим и физико-механическим параметрам, а также имеют низкую вязкость при комнатной температуре. При работе со связующими отмечена легкая дегазация при вакуумировании. Для систем с быстрым сроком жизни можно проводить несколько формовок и снятий за рабочую смену. А также разработка ООО «Композит изделия» позволила сократить время доотверждения в сравнении с зарубежными

аналогами, снизить с 15 часов до 5-8 для системы Резикарб ЭП, и с 15 часов до 10 для системы Резикарб Аэро.

Методом вакуумной инфузии были изготовлены образцы ПКМ на основе связующего Резикарб-ЭП и исследованы их физико-механические. Использовалась стеклоткани плетения твил с плотностью 200 г/м² (13 слоев) (Е-стекло), толщина плит получилась 2,5 мм. В качестве связующего использовалась система Резикарб-ЭП с набором отвердителей: быстрым (ЭП-Б), средним (ЭП-С) и медленным (ЭП-М). Режим отверждения: 24 часа при 25°C + доотверждение 5 часов при 80°C.

Эпоксидное связующее демонстрирует оптимальную вязкость, обеспечивая глубокую и равномерную пропитку стеклоткани без образования сухих зон, что способствует получению качественного изделия.

Физико-механические свойства полученных стеклопластиков подтверждены испытаниями:

Таблица 5.

Отвердитель	Испытание	Н/Д на испытание	Прочность (МПа)	Модуль (ГПа)
Резикарб ЭП-Б	Сжатие	ГОСТ Р 56812-2015	225-240	24
	Изгиб	ГОСТ 56810—2015	320-335	15
	Растяжение	ГОСТ Р 56785-2015	480-500	19
Резикарб ЭП-С	Сжатие	ГОСТ Р 56812-2015	220-225	23
	Изгиб	ГОСТ 56810—2015	300-315	14
	Растяжение	ГОСТ Р 56785-2015	460-480	18
Резикарб ЭП-М	Сжатие	ГОСТ Р 56812-2015	245-260	27
	Изгиб	ГОСТ 56810—2015	330-350	15
	Растяжение	ГОСТ Р 56785-2015	490-505	19

Полученные показатели свидетельствуют о высокой прочности материалов, что делает их пригодными для изготовления различных деталей и изделий в самых разных сферах промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hairi S. M. F. B. S. et al. A review on Composite Aerostructure Development for UAV application //Green Hybrid Composite in Engineering and Non-Engineering Applications. – 2023. – С. 137-157.
2. Negoita C., Cristache N., Bodor M. The epoxy resin-History and perspectives //Mater. Plast. – 2016. – Т. 53. – №. 3.

УДК 678.7.027:629.735.33

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФАНЕРЫ В ТЕХНОЛОГИИ БЕСПИЛОТНЫХ СИСТЕМ

А.А. МАКАРУК, М.В. АНДРЮХОВА

Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

С развитием технологий построения летательных аппаратов древесины как древесный композиционный материал (ДКМ) вытеснили металлы и синтетические композиты, превосходившие ее по стабильности и прочности в суровых условиях эксплуатации.

Однако развитие материаловедения привело к использованию древесины в виде многослойной структуры, которая благодаря модифицированию приобрела повышенную прочность, влагостойкость, долговечность и минимальный вес.

В процессе проектирования планера беспилотных летательных аппаратов (БЛА) необходимо учитывать полезную нагрузку, дальность, скорость, высоту, время полета, срок службы, коэффициент перегрузки. Конструкторами уделяется внимание возможности уменьшения массы БЛА исходя из внешних геометрических размеров, аэродинамики, силовой установки и свойств используемых материалов (прочность, жесткость, плотность) с учетом технологии изготовления деталей из них. Максимальной экономии веса и стоимости в прогрессивных самолетных конструкциях можно добиться за счет современных композитных конструкций, а также внедрения дешевых методов изготовления деталей и оснастки, сборки, ремонта [1].

Ключевыми причинами интереса к ДКМ для беспилотных систем являются высокое удельное отношение прочности и жесткости к весу. Материал должен быть максимально прочным и жестким, но при этом

как можно более легким. Многие современные ДКМ (например, модифицированная древесина или высококачественная авиационная фанера) по этому показателю сопоставимы со стеклопластиком и даже некоторыми алюминиевыми сплавами, но при этом часто дешевле и проще в обработке.

Древесина и материалы на ее основе эффективно гасят вибрации. Это критически важно для БЛА, так как снижает нагрузки на планер, увеличивая его ресурс и защищает чувствительную бортовую электронику (гироскопы, акселерометры, камеры) от тряски, что значительно улучшает качество стабилизации и съемки.

ДКМ не экранируют радиоволны, что делает их идеальным материалом для изготовления обтекателей антенн, корпусов для приемопередающей аппаратуры и других элементов, где главным является обеспечение беспрепятственного прохождения сигналов GPS, управления и телеметрии.

Данные материалы являются наиболее экологичным вариантом, так как они производятся из такого возобновляемого сырья, как древесина и имеют значительно меньший углеродный след по сравнению с синтетическими композитами на основе эпоксидных смол, стекло- и углеволокна, производство и утилизация которых сопряжены с большими экологическими издержками.

Высокая технологичность и обрабатываемость ДКМ упрощает и удешевляет процесс прототипирования и мелкосерийного производства, позволяя быстро вносить изменения в конструкцию, так как относительно легко режутся, фрезеруются на станках с ЧПУ, склеиваются и обрабатываются.

Стоимость древесных композитов меньше композитов на основе углеродного и стекловолокна, что позволяет снизить общую стоимость [2].

Наиболее подходящим ДКМ для беспилотных систем является авиационная фанера. Основное ее отличие от фанеры общего назначения заключается в повышенных требованиях к прочности и жесткости. Авиационная фанера изготавливается из наиболее прочных сортов древесины и подвергается более жесткому прессованию для обеспечения максимальной прочности при минимальном весе, что является критическим параметром для авиастроения.

Данный вид фанеры изготавливается в основном из березового шпона, количество слоев — три и более. За счет этого варьируется толщина пласта — минимальный показатель составляет 3 мм, максимальный — 16 мм. Это стандартные показатели фанеры, но есть и листы, толщина которых составляет всего 1 мм.

При этом авиационная фанера отличается повышенной плотностью и гибкостью. Тонкие шпонированные листы можно сгибать под

значительным углом без риска растрескивания, что позволяет изготавливать различные изогнутые элементы, которые отличаются надежностью и длительным сроком службы.

Фанера подразделяется в зависимости от используемой основы. Древесина, которая делается с пропиткой из фенолформальдегидной смолы с добавлением пластика, называется дельта-древесиной и используется для изготовления любых конструкций, в том числе и БЛА.

В зависимости от вида прослойки авиационная фанера выпускается нескольких марок. Марки БП-А и БП-В пропитываются смолой изнутри, а наружные слои покрываются пленкой, которая обеспечивает влагостойчивость.

Есть также марка БПС-1В, где шпонированная прослойка дублируется, что повышает прочность листа. Толщина такого пласта —

10 мм. И самая прочная марка — БС-1. Здесь используется смоляной состав СФЖ 3011, что позволяет увеличить нагрузку на лист до 96 МПа.

Кроме деления на марки фанера классифицируется по типу обработки поверхности. Она может быть шлифована с одной или с обеих сторон либо быть с шероховатой поверхностью. Ширина стандартного шпонированного листа может быть от 800 до 1500 мм, а длина от 1220 до 1550 мм.

Стоит отметить, что у шпонированного листа повышенная прочность — он выдерживает большие нагрузки и экстремальные условия. Его можно использовать в жару, мороз и при повышенной влажности, а также ставить на пласт большой вес.

Авиационная фанера находит применение практически во всех элементах конструкции самолета. Она используется для изготовления наружных обшивок фюзеляжа и крыльев, отделки пассажирских салонов, изготовления мебели и дверей в салонах. Кроме того, авиационная фанера применяется для изготовления внутренних переборок и перегородок в фюзеляже, что позволяет обеспечить высокую прочность конструкции самолета при минимальном весе [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Применение перспективных композиционных материалов в беспилотных авиационных комплексах // РУП «Издательский дом «Белорусская наука». — 2017 — №6. — 172 с.

2. Wood Plastic Composites: Their Properties and Applications [Electronic resource] / Kaimeng Xu, Guanben Du and Sigun Wang. — Engineered Wood Products for Construction, 2021. — Mode of access: <https://www.intechopen.com/chapters/77629>. — Date of access: 10.09.2025.

3. Авиационная фанера: что это такое и в чем преимущества [Электронный ресурс] / Аркадий Валерьевич – FANERA PITER. – Санкт-Петербург, 2024. – Режим доступа: <https://fanerapiter.ru/blog/aviacionnaya-fanera-chto-eto-takoe-i-v-chem-preimuschestva3546/>. – Дата доступа: 10.09.2025.

УДК 669.715:620.197:621.793

КОРРОЗИОННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16 ПОВЕРХНОСТНО-МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДАМИ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО АЗОТИРОВАНИЯ И ИОННО-АССИСТИРУЕМОГО ОСАЖДЕНИЯ ЦЕРИЯ

В.Г. МАТЫС, О.Г. БОБРОВИЧ, В.В. ПОПЛАВСКИЙ
Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

Современные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) предъявляют всё более жёсткие требования к массо-габаритным характеристикам конструкционных материалов. Снижение веса конструкции напрямую влияет на дальность полёта, манёвренность, полезную нагрузку и энергетическую эффективность БПЛА. В этой связи особую актуальность приобретает замена традиционных высокопрочных стальных элементов используемых, например в шарнирных узлах и осях на более лёгкие, но при этом прочные и коррозионно-стойкие алюминиевые сплавы. Алюминиевый сплав Д16 широко используется в авиационной промышленности благодаря высокому отношению прочности к массе [1]. Однако его ограниченная коррозионная стойкость и сравнительно низкая твёрдость поверхности требуют дополнительных методов модификации. В настоящей работе предлагается комбинированный подход к упрочнению поверхности сплава Д16, включающий ионно-плазменное азотирование для упрочнения поверхности [2] и последующее нанесение тонких (~30–50 нм) цериевых плёнок методом вакуумного ионно-ассистируемого осаждения для повышения коррозионной стойкости [3].

Целью настоящего исследования является сравнительная оценка коррозионной стойкости алюминиевого сплава Д16 в трёх состояниях: исходном (Д16), после ионно-плазменного азотирования (Д16N), а также после азотирования с последующим нанесением цериевого покрытия методом ионно-ассистируемого осаждения (Д16N\Се). Особое

внимание уделяется анализу эффективности поверхностной модификации, затрагивающей различные глубины материала – от нескольких микрон при азотировании до десятков нанометров при нанесении цериевых плёнок методом вакуумного ионно-ассистированного осаждения. Для оценки защитных свойств образцов применён метод электрохимической импедансной спектроскопии, позволяющий количественно охарактеризовать сопротивление коррозионным процессам и структуру пассивного слоя.

Ионно-плазменное азотирование проводилось при 450 °С в среде, содержащей азот, аргон и водород при 160 Па после предварительной ионно-плазменной очистки поверхности в среде Ar H₂ [4]. В модифицированном поверхностном слое фиксировался кислород до толщины ~1 мкм и азот до толщины ~7 мкм. Ионно-ассистированное осаждение церия проводилось из плазмы вакуумного дугового разряда (~10⁻² Па) между цериевыми электродами при ускоряющем напряжении 10 кВ [5]. Толщина модифицированного слоя, содержащего церий, не превышала 50 нм. На поверхности фиксировались также капельная фаза расплавленного церия, образующаяся в процессе дугового разряда. Размер капель – 0,1-1 мкм.

Спектры электрохимического импеданса образцов получены в растворе 3,5 % NaCl при потенциале разомкнутой цепи установившемся после 30 мин выдержки в растворе в диапазоне частот от 50 кГц до 100 мГц в потенциостатическом режиме с амплитудой потенциала 10 мВ.

Для описания спектров импеданса образцов исходного и азотированного сплава использовалась эквивалентная электрическая схема с одной временной константой, которой соответствует простая модель поверхности с оксидной пленкой, характеризующейся определённым сопротивлением (R_f) и ёмкостью (C_f) (рис. 1). Вместо ёмкости для аппроксимации спектров импеданса использовался элемент постоянной фазы с параметрами Y_f и n_f .

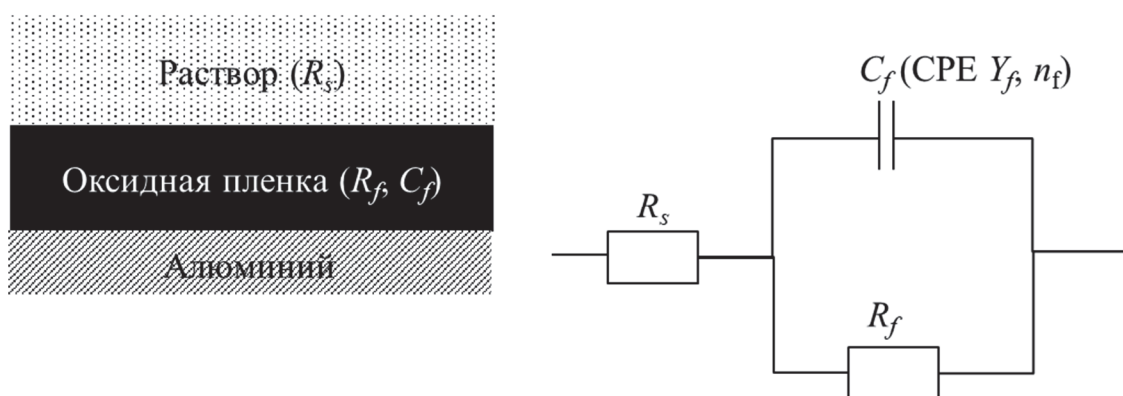


Рис. 1. Модель и эквивалентная электрическая схема границ раздела Д16 – электролит и Д16\N – электролит.

Для азотированного сплава Д16 с осажденным церием (Д16\N\Се) на спектрах импеданса можно выделить две временные константы. Поэтому для аппроксимации спектров импеданса использована модель, предполагающая наличие на поверхности плотной и пористой оксидной пленки (рис. 2), где R_d и C_d – сопротивление и емкость плотного слоя, а R_p и C_p – сопротивление и емкость пористого слоя.

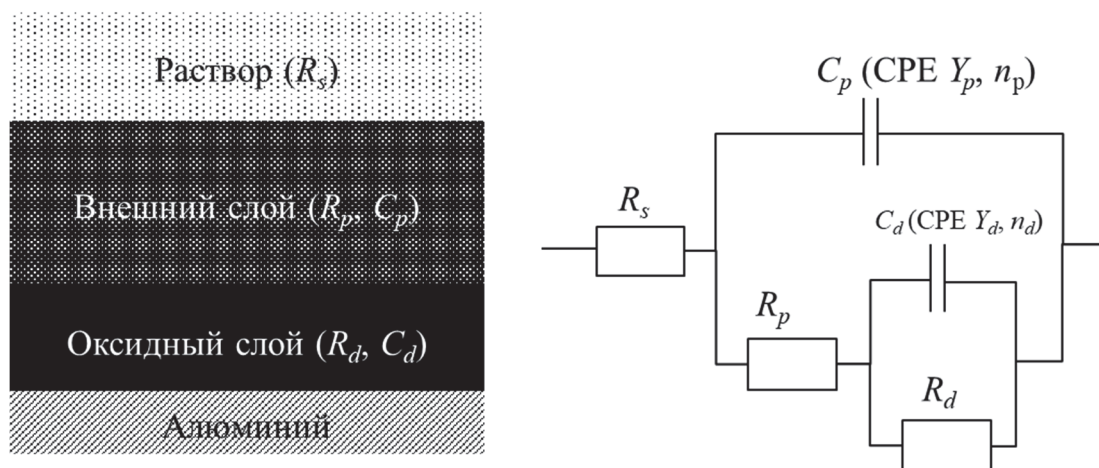


Рис. 2. Модель и эквивалентная электрическая схема границы раздела Д16\N\Се – электролит.

Рассчитанные значения параметров эквивалентных схем представлены в таблице. Азотирование практически не изменяет сопротивление оксидной пленки на сплаве Д16, тогда как ионно-ассистированное осаждение церия повышает общее сопротивление пленки а значит и защитные свойства примерно в 2 раза.

Таблица – Параметры эквивалентных схем.

Образец	R_f , Ом·см ²	Y_f , мкФ·с ⁿ⁻¹	n_f	R_d , Ом·см ²	Y_d , мкФ·с ⁿ⁻¹	n_d
Д16	438	57,4	0,882	—	—	—
Д16\N	440	190	0,672	—	—	—
Д16\N\Се	34	641	0,53	710	2400	0,79

Таким образом, исследуемое двухступенчатое покрытие позволяет существенно повысить защитные свойства материала, что подтверждено методом электрохимической импедансной спектроскопии. Полученные результаты демонстрируют потенциал применения модифицированного сплава Д16 в конструкциях БПЛА, где критически важны лёгкость, надёжность и устойчивость к агрессивным средам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белецкий, В. М. Алюминиевые сплавы: Состав, свойства, технология, применение. Справочник / В. М. Белецкий, Г. А. Кривов. – Киев: КОМИНТЕХ, 2005. – 365 с.
2. Taherkhani, K. Composite coatings created by new method of active screen plasma nitriding on aluminium alloy 6061 / K. Taherkhani, M. Soltanieh // J. Alloys Compd. – 2018. – Vol. 741. – P. 1247–1257.
3. An Auger and XPS survey of cerium active corrosion protection for AA2024-T3 aluminum alloy / A. Uhart [et al.] // Appl. Surf. Sci. – 2016. – Vol. 390. – P. 751–759.
4. Поплавский, В. В. Исследование процессов фазообразования при ионно-плазменном азотировании сплавов титана / В. В. Поплавский, И. Л. Поболь, А. Н. Дробов // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 15-й Международной конференции, Минск, 26-29 сентября 2023 г. - Минск : БГУ, 2023. - С. 102-104.
5. Poplavskii, V.V. Composition and electrocatalytic properties of the coatings formed by the ion-beam-assisted deposition of platinum from a pulsed arc-discharge plasma onto aluminum / V. V. Poplavskii, T. S. Mishchenko, V. G. Matys // Technical Physics. – 2010. – Vol. 55, № 2. – P. 296-302.

УДК 665.947.8; 668.8

ПРОИЗВОДНЫЕ СМОЛЯНЫХ КИСЛОТ И ТЕРПЕНОВЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

И.А. ЛАТЫШЕВИЧ^{1,2}, А.Л. НАРКЕВИЧ², В.А. ОСТАНИН²

¹ Государственное научное учреждение

«Институт физико-органической химии НАН Беларуси»,

²Белорусский государственный технологический университет,
Минск, Беларусь

Полимерные композитные материалы (ПКМ), получаемые путем совмещения матрицы на основе термореактивных и термопластичных полимеров с наполнителями, включая армирующие, образуют весьма широкий спектр материалов ввиду многообразия рецептур полимерных основ для матрицы, а также природы, формы, размеров и ориентации наполнителей. Выбор ПКМ или разработка его состава обусловлены, как

правило, эксплуатационными требованиями к изделию или их группе (температура эксплуатации, жесткость, прочность, масса, теплопроводность, электроизоляционные свойства, радиопрозрачность и др.), а также технологическим параметрам процесса его производства (удельное давление при формообразовании, температура, время выдержки и др.).

Наиболее полно механические характеристики композитов в изделии реализуются, когда армирующий наполнитель имеет упорядоченное расположение с заданной ориентацией частиц в матрице. Для ПКМ в таких случаях применяют стеклянные, углеродные и др. волокна в виде нитей, жгутов (ровингов) или полученных из них лент, тканей и т.п.

При совмещении наполнителя и матрицы необходимо, чтобы последняя заполняла как можно большее пространство между частицами наполнителя как на макроуровне – между пучками и нитями, так и на микроуровне – между волокнами, из которых они состоят. В этой связи большое значение имеет вязкость матричной композиции в момент совмещения компонентов. Ввиду малых размеров волокон, а соответственно расстояний между ними, наиболее эффективно в части производительности и энергозатрат их совмещение с термореактивными матричными композициями (или их растворами) на основе эпоксидных, фенолформальдегидных, полиэфирных и др. смол.

Применяемые в настоящее время технологии для производства изделий из ПКМ предполагают совмещение компонентов как непосредственно в процессе производства изделия (или его составной части), так и применяя предварительно пропитанный матричной композицией, в том числе ее раствором, армирующий наполнитель, получая сырьевой материал, именуемый препрегом. При этом срок хранения препрега может составлять от нескольких часов до нескольких месяцев в зависимости от применяемых компонентов и условий хранения.

Маркетинговые исследования [1] показали, что мировой рынок ПКМ в последние годы динамично развивается. По оценкам международных экспертов в 2019 г. он составил более 99 млрд. долл. в стоимостном выражении и 12,0 млн. т. в натуральном выражении. Они считают, что к 2027 г. рынок композитов расширится на 6,8% в год и по стоимости возрастет до 112 млрд. долл.

Одним из факторов, который в настоящее время негативно сказывается на росте применения ПКМ – импортозависимость. Если белорусские и российские производители вполне способны обеспечить потребности рынка в армирующих материалах на основе стеклянных, углеродных и синтетических волокон, то ситуация с матричными композициями сложнее, так как основное исходное сырье – смолы, катализаторы полимеризации, модифицирующие добавки и т.п. импортируются.

Для основы матричной композиции – термореактивных синтетических смол (фенольные, эпоксидные, полиэфирные и др.) – необходимы катализаторы полимеризации, позволяющие получить трехмерную структуру (сшивку) матрицы в готовом изделии. Наиболее универсальными катализаторами являются аминопроизводные, позволяющие проводить процесс как «холодной», так и «горячей» полимеризации с образованием сшитых продуктов с высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами. К основным недостаткам традиционно применяемых аминов можно отнести: плохую отверждающую способность при низких температурах; плохую работу в условиях повышенной влажности; быстрое лавинообразное протекание реакции полимеризации, в связи, с чем крайне затруднительное отверждение слоя смолы более нескольких миллиметров.

Государственному научному учреждению «Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси» поставлена задача разработать препрег на основе однонаправленных и хаотически ориентированных стеклянных волокон и матричной композиции, которая в основном устраняла бы вышеперечисленные недостатки. Он должен иметь хорошую адгезию не только к армирующим волокнам, но и к древесине и термопластам, а также, чтобы сырьевая база для компонентов композиции производилась на территории Республики Беларусь.

В качестве основного компонента матричной композиции выбран эпоксидный олигомер, наличие гидроксильных групп в котором позволяет создавать связующие, характеризующиеся высокими адгезионными свойствами по отношению к разнообразным материалам. А перспективными катализаторами полимеризации эпоксидных смол ангидридного типа могут успешно выступать производные смоляных кислот и терпеновых углеводов, которые также являются продуктом переработки лесохимических предприятий.

Создание ПКМ с использованием лесохимического сырья, является актуальной задачей современной науки. Несмотря на большой объем научных исследований, и публикаций по разработке ПКМ, эта проблема до сих пор остается до конца не решенной. Однако данные об использовании лесохимического сырья в качестве компонента полимерного связующего для ПКМ в мировой практике отсутствуют.

Доступность исходного терпентина, отсутствие сложных операций в процессе получения, высокие реакционные свойства делают их ценным химическим сырьем [2], а варьирование компонентного состава лесохимического сырья позволит получить ПКМ с заданными физико-механическими свойствами [3].

Поэтому наличие в Республике Беларусь достаточной сырьевой базы (отечественного возобновляемого терпеноидного сырья) делает исследования по созданию новых терпеноидных продуктов и высокоэффективных материалов на их основе актуальными.

Ввиду особенностей компонентной базы матричной композиции в исходном состоянии и для распределения компонентов в объеме в состав композиции, естественно, включен растворитель, разрешенный к использованию на предприятиях Республики Беларусь.

Условия отверждения матричной композиции – время и температура – исследовались с использованием дифференциальной сканирующей калориметрии, а полнота полимеризации эпоксидного олигомера вторичными терпеноидными продуктами, с точки зрения химических процессов – методом ИК-спектроскопии путем оценки наличия (отсутствия) полос поглощения, характерных для эпоксидных и ангидридных групп [4].

Изменением содержания ускорителя полимеризации в матричной композиции возможно регулировать температуру протекания этого процесса. Разработаны соответствующие рецептуры, позволяющие полимеризоваться композиции при температурах от 120 до 200°C [5]. Это приобретает особое значение, если препрег на основе такой матрицы участвует в процессе формообразования изделий, состоящих из различных материалов для отдельных функциональных слоев, которые в свою очередь «требовательны» к температурным режимам.

С использованием разработанной матричной композиции получены препреги на основе стеклянных тканей различного переплетения, однонаправленных лент и матов.

Жизнеспособность препрега оценивали как по стандартизованным методикам, так и по эксплуатационным характеристикам конечного изделия, в составе которого применен препрег, в частности – для длинномерного стержня, усиленного слоями однонаправленно армированного ПКМ, контактирующего с основой из древесины и функциональными слоями на основе термопластов. Хранение осуществлялось в морозильной камере при минус 18°C до трех месяцев – условия определены потребителем препрега для соответствия импортозамещаемому сырью. По результатам контроля технологических параметров экспериментальным способом установлен и подтвержден факт жизнеспособности разработанного препрега при соблюдении условий их хранения [6].

В случаях, когда препрег применяется в составе изделия, содержащего материалы растительного происхождения, например, древесина, склонных к развитию плесневых грибов, доказано, что использование разработанных препрегов на основе химически модифицированного терпеноидного сырья позволит полностью подавить рост плесневых грибов, что, следовательно, исключит биодеструкцию указанной части изделия и сохранит эксплуатационные свойства конечного продукта [7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Дориомедов, М.С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) // Труды ВИАМ. – 2020. – № 6–7 (89). – С. 29–37;
2. Латышевич И. А., Ключев А.Ю., Козлов Н.Г., Прокопчук Н.Р., Огородникова М.М. Получение, исследование состава и применение терпеноидномалеиновых аддуктов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2017. – Вып. 221. – С. 294–308.
3. Ключев А.Ю., Латышевич И.А., Прокопчук Н.Р., Гапанькова Е.И., Козлов Н.Г. Новые направления переработки и использования сосновой живицы // Полимерные материалы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 2. – С. 68–77.
4. Латышевич И.А., Гапанькова Е.И., Козлов Н.Г. Определение полноты полимеризации эпоксидных олигомеров // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2022. – Вып. 238. – С. 203–214.
5. Латышевич И.А., Гапанькова Е.И., Козлов Н.Г., Бильдюкевич А.В., Николаева К.В., Даниловой-Третьяк С.М. Определение оптимального содержания ускорителя полимеризации в эпоксидных связующих для полимерных композиционных материалов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2022. – Вып. 240. – С. 211–222.
6. Гапанькова Е.И., Латышевич И.А., Козлов Н.Г., Бильдюкевич А.В. Оценка влияния длительности хранения на свойства препрегов и механические свойства лыж // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2023. – Вып. 242. – С. 189–203.
7. Латышевич И.А., Козлов Н.Г., Глевицкая Т.А., Гапанькова Е.И. Биоцидные свойства препрегов на основе терпеноидного сырья // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2024. – Вып. 71 (97). – С. 64–67.

УДК 66.021.3

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АППАРАТОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ГАЗОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БПЛА

Д.Ю. МЫТЬКО, В.С. ФРАНЦКЕВИЧ, Р.И. ЛАНКИН
Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

Современное производство беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) – это симбиоз высоких технологий, точного машиностроения и химических процессов. Ключевым аспектом, определяющим летные

характеристики дронов, является применение современных материалов. Однако производство их деталей сопряжено с образованием технологических газов, требующих эффективной очистки. В данной статье мы рассмотрим эту взаимосвязь и сфокусируемся на использовании массообменных насадочных аппаратов со структурированной регулярной насадкой.

Детали БПЛА должны сочетать минимальный вес с максимальной прочностью, жесткостью и устойчивостью к внешним воздействиям. Этим требованиям в полной мере отвечают полимерные композиционные материалы, являющиеся основой современного БПЛА. Это, прежде всего, углепластики и стеклопластики. Их производство включает процессы пропитки волокон эпоксидными, полиэфирными или другими смолами, отверждения в автоклавах, а также механической обработки (резки, шлифовки). На этих этапах возможны выделения стирола, формальдегида, фенола, органических растворителей и мелкодисперсной пыли.

Таким образом, технологические газы на производстве БПЛА представляют собой сложную, многокомпонентную и часто высокоагрессивную смесь. Их очистка – не просто экологическое требование, а необходимое условие для обеспечения безопасности персонала и сохранения коррозионной стойкости дорогостоящего оборудования.

Для улавливания химических компонентов из газовых выбросов наиболее эффективным и широкоприменимым методом является абсорбция – процесс избирательного поглощения компонентов газовой смеси абсорбентом.

Аппаратом, в котором этот процесс реализуется, является абсорбер или скруббер. Классическим и самым распространенным типом является насадочный абсорбер. Его сердцем является насадка, которая обеспечивает развитие поверхности контакта между газом и жидкостью.

Эффективность насадочного аппарата напрямую зависит от типа используемой насадки: нерегулярные, регулярные насадки.

Преимущества регулярных насадок перед другими видами для производства БПЛА: низкое гидравлическое сопротивление, упорядоченная структура, высокая эффективность массообмена, равномерное распределение жидкости и газа по сечению аппарата, предсказуемость и масштабируемость, устойчивость к загрязнению.

На рис. 1 представлены регулярные насадки компании «Sulzer Chemtech»

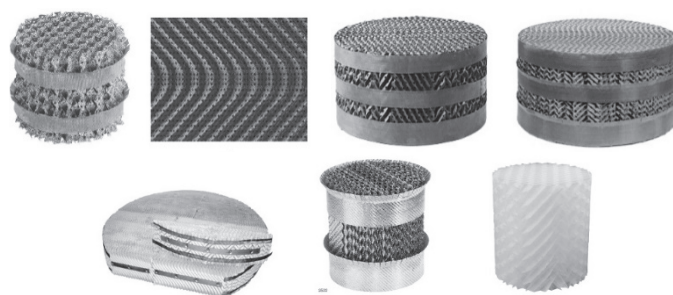


Рис. 1. Регулярные насадки компании «Sulzer Chemtech»

Применения насадочных абсорберов с регулярными насадками для очистки технологических газов при производстве БПЛА позволяют создать энергоэффективные и компактные системы очистки. Внедрение таких аппаратов обеспечивает соблюдение экологических норм и снижение эксплуатационных затрат, что способствует развитию технологий в авиастроении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фарахов М.И., Лаптев А.Г., Башаров М.М. Модернизация массо-обменных аппаратов новыми насадками в химической технологии // Теоретические основы химической технологии. – 2015. – №3. – С. 247–252.
2. SULZER Structured packings [Электронный ресурс]. – URL: https://tisys.ru/services/catalog/meshalki-miksery-smesiteli/staticheskie-smesiteli-sulzer-/?sphrase_id=23957 (дата обращения 12.10.2022).

УДК 621.762:621.791.92

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ ОПТИМИЗИРОВАННЫХ ДЕТАЛЕЙ БПЛА

А.Ф. ИЛЬЮЩЕНКО, А.И. ЛЕЦКО, Т.А. НИКОЛАЙЧУК,
О.О. КУЗНЕЧИК, Н.М. ПАРНИЦКИЙ

Государственное научное учреждение «Институт порошковой
металлургии имени академика О.В. Романа»
Минск, Беларусь

Аннотация. В работе рассмотрена возможность применения метода селективного лазерного сплавления (СЛС) и топологической

оптимизации деталей для производства беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Введение. Современные технологии аддитивного производства металлических изделий всё чаще используют для получения деталей сложных форм с высокой точностью и минимальными затратами материала. К одним из перспективных методов получения геометрически-сложных форм и изделий при использовании лазерного луча в работах [1-3] относят метод СЛС, схема которого представлена на рис. 1.

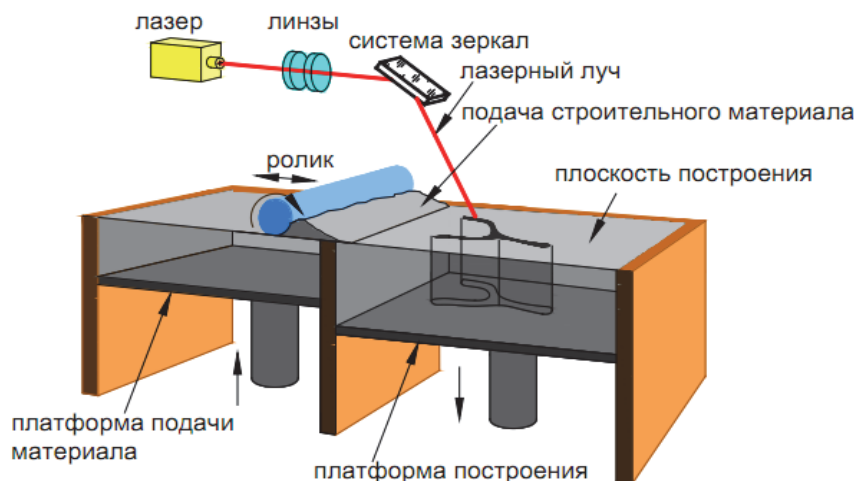


Рис. 1. Общеизвестная схема реализации метода СЛС [3]

Современные технологии аддитивного производства, основанные на использовании метода СЛС, содержат определенный цикл технологических операций для получения изделий, который представлен в виде некоторой обобщенной схемы на рис. 2.

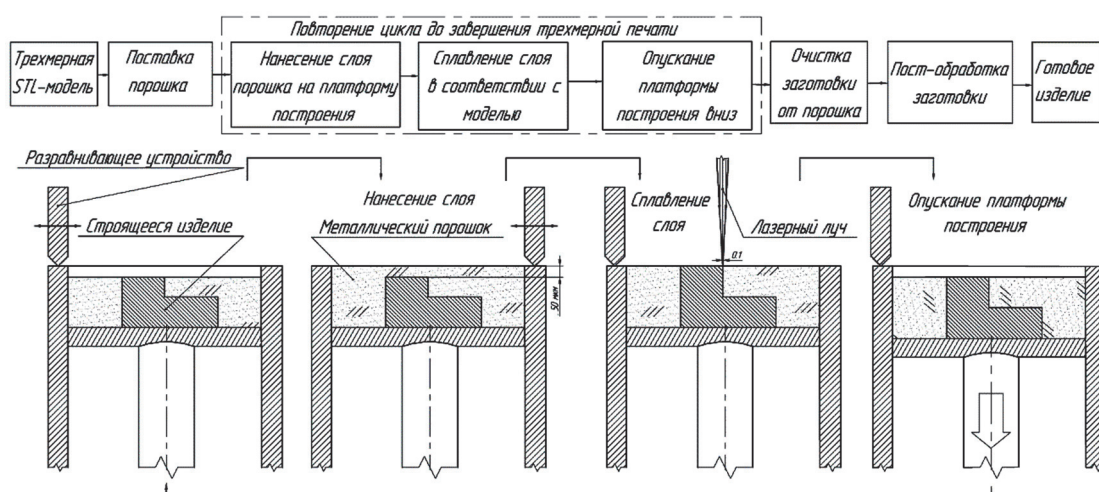


Рис. 2. Обобщенная технологическая схема реализуемого в технологической камере 3D-принтера процесса СЛС [2]

Получение изделия методом СЛС согласно представленной схемы (рис. 2) можно разделить на три основных этапа:

- на предварительные операции, проводимые при подготовке 3D-принтера к 3D-печати заранее подготовленной геометрии (STL-модель) и её конвертации в так называемый G-код, а также, вместе с этим, загрузки металлического порошка в бункер его подачи.

- на реализацию технологического цикла изготовления изделия по методу СЛС, содержащую циклические операции нанесения порошкового слоя в «рабочую зону» на 50-100 мкм и последующего его сплавления лазерным лучом. При этом формируемая ванна расплава, достигает температур до 1700 К, что может обеспечивать достаточное сплавление частиц размерами от 15 до 70-100 мкм.

- на последующую обработку полученных заготовок вместе с платформой 3D-печати с использованием дополнительного оснащения.

Перспективы изготовления деталей беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) методом СЛС в первую очередь связаны с возможностью быстрого прототипирования геометрически-сложных форм (кронштейны, элементы корпусов, топливные коллекторы) и внесения корректировок без использования дополнительного технологического оснащения. Вместе с этим, зачастую при разработке БПЛА возникают задачи связанные с необходимостью облегчения их конструкций для повышения маневренности и скорости с необходимостью сохранения их прочностных и эргономичных характеристик. Решению такой задачи способствует проведение топологической оптимизации.

В качестве примера проведения топологической оптимизации предложена тестовая 3D-модель с тремя отверстиями. Для расчетов использовался программный комплекс ANSYS v19, позволяющий выполнить моделирование распределения напряжений и деформаций с учетом заданных граничных условий. На одно из отверстий прикладывалась постоянная нагрузка, остальные грани модели фиксировались в пространстве. В качестве материала принят титановый сплав BT6 из библиотеки ANSYS v19. В процессе численного моделирования осуществлялось поэтапное перераспределение материала внутри конструкции, что позволило выявить области с наименьшими напряжениями и исключить их из геометрии. Основные этапы расчёта представлены на рис. 3.

Применение расчётов топологической оптимизации позволяет рационально перераспределять материал внутри изделия без снижения прочности конструкции, а численные расчеты показывают распределение напряжений и деформаций в оптимизированных деталях. Проведение такой оптимизации на участке аддитивных технологий Института порошковой металлургии имени академика О.В. Романа с последующей

3D-печатью методом СЛС из порошка титанового сплава марки ВТ-6 способствовало изготовлению ряда малогабаритных деталей сложных форм (см. рис. 4) различного назначения.

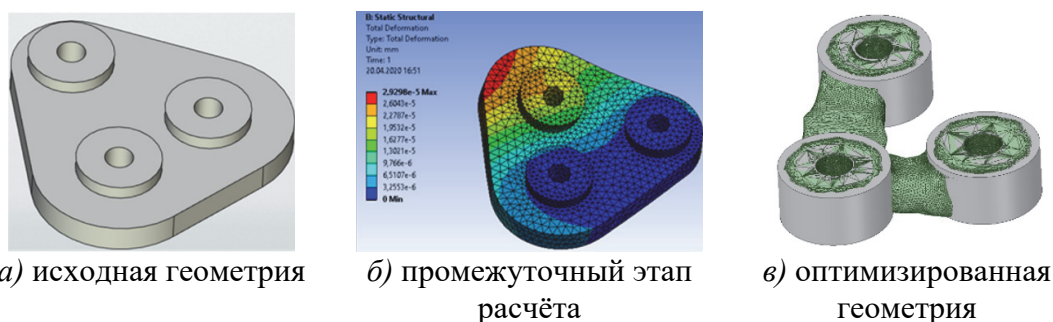


Рис. 3. Тестовая модель на различных этапах проведения топологической оптимизации

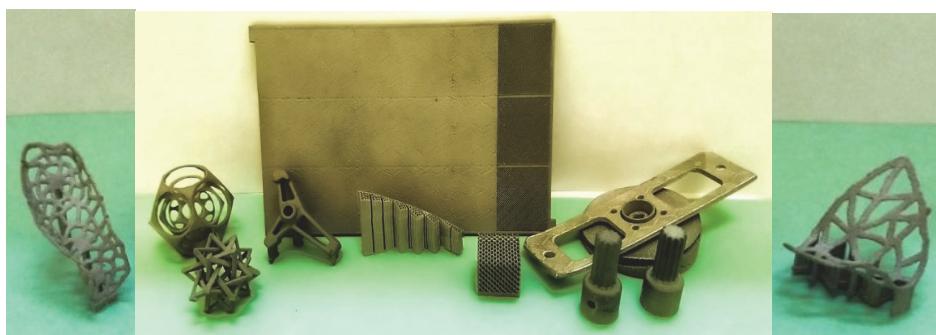


Рис. 4. Изготовленные методом СЛС из порошка титанового сплава марки ВТ6 малогабаритные детали сложных форм

Таким образом, совмещение метода СЛС и топологической оптимизации обеспечивает рациональное использование материала и способствует получению деталей различного назначения.

Вывод. Исходя из изложенного метод СЛС позволяет создавать изделия сложных форм, а также облегченных конструкций из металлического порошка, которые могут быть использованы в машиностроении в целом, а в частности и при конструировании БПЛА. Сочетание методов СЛС и топологической оптимизации изделий, в целом, может способствовать росту практического применения при 3D-печати деталей различных форм (кронштейны, элементы корпусов, топливные коллекторы) БПЛА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Additive manufacturing: current state, future potential, gaps and needs, and recommendations / Y. Huang [et al.] // J. Manuf. Sci. Eng. – 2015. – Vol. 137. – Art. ID 014001-1. – 137 p.

2. Gibson I. Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing/ I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker. – New York: Springer, 2010. – 459 p.

3. Ильющенко А.Ф. Аддитивные технологии и порошковая металлургия – Минск: Медисонт, 2019. – 260 с.

4. Определение критериев качества получаемых при 3D-печати изделий методом селективного лазерного сплавления металлических порошков // Ильющенко А. Ф., Николайчук Т. А., Лецко А. И. / Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении (ИТММ-2024): материалы VIII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Пермь, 07–12 окт. 2024 г. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2024. – С. 78–82.

5. Проектирование технологической камеры для послойного селективного лазерного сплавления и термообработки, получаемых при 3D-печати изделий // Ильющенко А. Ф., Лецко А. И., Кордикова Е. И. [и др.] Перспективы развития аддитивных технологий в Республике Беларусь: сб. докладов междунар. науч.-практ. симпоз. – Минск: Беларуская навука, 2021. – С. 52–61.

6. Анализ конструкций, использующих лазерное излучение 3D-принтеров для 3D-печати металлическими порошками: перспективы развития, методы их термического упрочнения / А.Ф. Ильющенко, А.И. Лецко, Н.М. Парницкий [и др.] // Перспективы развития аддитивных технологий в Республике Беларусь: сб. докладов Междунар. науч.-практ. симпозиума. - Минск: Беларуская навука, 2021. - С. 62-83.

УДК 666.193

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БАЗАЛЬТОВЫХ РАСПЛАВОВ ПУТЕМ ВВЕДЕНИЯ БОРСОДЕРЖАЩИХ КОМПОНЕНТОВ

**Ю.Г. ПАВЛЮКЕВИЧ, А.П. КРАВЧУК,
Ю.А. КЛИМОШ, Е.Е. ТРУСОВА**

**Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь**

Рост уровня требований к миниатюризации и маневренности БПЛА обуславливает расширение спроса на передовые конструкционные материалы, в частности композиты. Использование таких материалов

позволяет создавать легкие и высокопрочные конструкции, что напрямую обеспечивает повышение летно-технических характеристик БПЛА – показателей дальности полета, грузоподъемности, энергоэффективности и управляемости. Переход на композиционные материалы – стратегическая необходимость для обеспечения дееспособности и инновационного развития производства БПЛА.

Ключевое преимущество композиционных материалов заключается в возможности целенаправленного проектирования их свойств за счет выбора матрицы и армирующего наполнителя. Это позволяет получать материалы, адаптированные под конкретные условия эксплуатации.

Для армирования композитов в производстве БПЛА широко используются углеродные волокна и стекловолокно типа Е. Применение углеродных волокон, несмотря на исключительно высокие прочностные характеристики, модуль упругости и малый вес, ограничивается их горючестью и высокой стоимостью: цена углеволокна в 20–25 раз превышает стоимость стекловолокна типа Е.

Стекловолокно типа Е, в свою очередь, остается самым распространенным армирующим компонентом композитов благодаря сочетанию приемлемой устойчивости и низких цен. Однако стекловолокно Е имеет следующие недостатки: гигроскопичность, низкую устойчивость к щелочным средам.

Альтернативным решением является использование базальтовых непрерывных волокон, обладающих наилучшим соотношением стоимость/характеристики в сравнении с углеродным волокном и стекловолокном типа Е для получения композитов в производстве БПЛА. Производство непрерывного базальтового волокна является экологически безопасным процессом: оно не требует использования вредных компонентов, полностью соответствует современным требованиям, развитию декарбонизации промышленности и сокращению углеродного следа.

Непрерывное базальтовое волокно представляет собой материал, обладающий высокими физико-химическими свойствами, включая термостойкость, механическую прочность и химическую устойчивость. Однако получение стекловолокна высокого качества затрудняется колебаниями химического состава базальтов, высокой кристаллизационной склонностью расплавов и сложностью сохранения оптимальных реологических параметров при вытягивании волокна. Эти факторы приводят к вариативности температуры формования и нестабильности технологического процесса вытягивания волокна, что снижает выход годного продукта.

Целью настоящего исследования является повышение технологичности базальтовых расплавов для производства непрерывного волокна

путем введения в состав сырьевых композиций борсодержащего компонента – колеманита, включающего, мас. %: B_2O_3 39,90; CaO 26,92; SiO_2 5,28; MgO 2,79; SrO 1,32; Al_2O_3 0,15; Fe_2O_3 0,05; R_2O 0,11; SO_3 0,20; п.п.п. 23,28.

На основе базальта следующего химического состава, мас. %: SiO_2 54,03; Al_2O_3 18,21; $FeO+Fe_2O_3$ 9,96; CaO 7,94; MgO 3,63; Na_2O 2,51; K_2O 2,03; TiO_2 1,12; P_2O_5 0,17; MnO 0,16 при добавлении колеманита в количестве 5–20 мас. ч. (2–8 мас. % B_2O_3) подготовлены исследуемые сырьевые композиции.

Стекла на основе сырьевых композиций базальт–колеманит синтезированы в газовой пламенной печи при максимальной температуре 1480 ± 10 °С.

Технологические параметры формования непрерывного волокна из расплава фильерным способом определяются температурной зависимостью вязкости, верхней температурой кристаллизации (температурой ликвидуса) и скоростью роста кристаллов, а также поверхностным натяжением расплава. Важными технологическими параметрами производства базальтовых волокон являются также начальная и конечная температуры плавления сырья, которые косвенно характеризуют энергозатраты на получение расплава.

Согласно результатам дифференциальной сканирующей калориметрии, введение колеманита обеспечивает сдвиг температурного интервала плавления сырьевых композиций на 80–100 °С по сравнению с чистым базальтом.

Установлено, что увеличение содержания B_2O_3 до 8 мас. % приводит к значительному подавлению кристаллизационной способности стекол: температурный интервал кристаллизации сужается, температура верхнего предела кристаллизации снижается с 1285 °С (для немодифицированного стекла) до 1160 °С. Это свидетельствует о повышении устойчивости к кристаллизации стекол, полученных при добавке колеманита к базальту.

Реологические свойства расплавов исследованы на вискозиметре RSV-1600. Установлено, что высокотемпературная вязкость расплавов снижается с увеличением содержания B_2O_3 , причём наиболее выраженный эффект наблюдается при концентрации оксида бора 2–4 мас. %.

В ходе экспериментальной проверки способности расплавов к волокнообразованию выявлено, что при содержании $B_2O_3 \geq 4$ мас. % обеспечивается улучшение процесса формования, он заметно стабилизируется, снижается частота обрывов волокна и повышается его качество.

Анализ данных определения прочности волокон показал, что изменение ее величины связано как с изменением структуры стекла (степени полимеризации), так и дефектности образцов. При увеличении содержания B_2O_3 прочность волокон увеличивается. Экстраполяция полученных зависимостей прочности волокна от состава сырьевой композиции и диаметра волокна, позволяет прогнозировать ее величину для волокна диаметром ~ 10 мкм более 2100 МПа, что соответствует уровню прочности современных аналогов.

Оценка устойчивости волокон к воздействию агрессивных сред проводилась по результатам определения водостойкости и щелочестойкости. Выявлено, что водостойкость волокон оставляет 99,4–99,6 %, что говорит о высокой инертности к водной среде. Щелочестойкость волокон, полученных с введением колеманита, находится в пределах 99,1–92,8 % и существенно не отличается от немодифицированных образцов.

Таким образом, добавка к базальту колеманита в количестве 10–15 мас.ч. (соответственно 4–6 мас.% B_2O_3) обеспечивает снижение температуры плавления композиции базальт–колеманит на 80–100 °С, снижение вязкости расплавов, подавление кристаллизации и расширение температурного интервала формования волокна, повышение прочности волокна, сохранение его высокой химической стойкости. Применение колеманита в производстве непрерывных базальтовых волокон позволит повысить их качество, снизить долю брака и затраты энергии на процессы стекловарения и формования волокна, увеличить срок службы фильерных питателей.

УДК 666.266.6-971

ТЕРМОСТАБИЛЬНЫЕ СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$

**Ю.Г. ПАВЛЮКЕВИЧ, М.В. ПАНЦЕВИЧ,
У.В. БЕДНАРОВСКАЯ**

**Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь**

Разработка термостабильных оптически прозрачных материалов является актуальной задачей для аэрокосмической промышленности, высокоточной оптики и лазерной техники. Стеклокристаллические материалы (ситаллы) на основе системы $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ обладают уникальным

сочетанием свойств: близким к нулю температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР), высокой термостойкостью и оптической прозрачностью. Однако получение материалов с заданным комплексом характеристик сопряжено с рядом технологических сложностей, таких как необходимость обеспечения объемной кристаллизации, контроля размера кристаллов и предотвращения деформации изделий в процессе синтеза.

Целью работы являлась разработка составов стекол и режимов их термообработки для получения прозрачных термостабильных ситаллов. В работе исследовалось влияние модифицирующих оксидов (ZnO , MgO , P_2O_5) и комбинированного катализатора кристаллизации ($\text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2$) на структуру и свойства стекол на основе системы $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$.

Методика исследований включала синтез стекол, их отжиг и последующую ситаллизацию. Для изучения свойств использовались дилатометрия, дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК), рентгенофазовый анализ (РФА). Определялись плотность, микротвердость, ТКЛР и кристаллизационная способность образцов.

В результате проведенных исследований были разработаны составы стекол, обеспечивающие высокую кристаллизационную способность и формирование мелкокристаллической структуры. Установлены оптимальные температурные режимы двухступенчатой термообработки, позволяющие управлять процессами нуклеации и роста кристаллов. Показано, что введение P_2O_5 способствует снижению температуры ликвидуса и улучшает технологичность стекол, а комбинация TiO_2 и ZrO_2 эффективно катализирует кристаллизацию с образованием β -кварцевых твердых растворов.

Таким образом, разработанные составы и режимы термообработки позволяют получать термостабильные стеклокристаллические материалы с заданным комплексом свойств для применения аэрокосмической промышленности в условиях экстремальных термических нагрузок.

Ключевые слова: стеклокристаллические материалы, ситаллы, $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, термостойкость, катализируемая кристаллизация, температурный коэффициент линейного расширения.

ЛИТЕРАТУРА

1. I. W. Donald. Production, Properties and Applications of Glass-Ceramics. Springer, 2018.
2. A. Bachiurrini, R. Moretti. Crystallization of $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ Glasses with TiO_2 and ZrO_2 as Nucleating Agents // Journal of the European Ceramic Society. 2020. Vol. 40. P. 215–223.

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ НИКЕЛЕМ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

А.В. ПЯНКО¹, О.И. ШУНЬКИНА^{1,2}, А.А. ЧЕРНИК¹

¹Белорусский государственный технологический университет

² ОАО «Минский часовой завод»

Минск, Беларусь

Современное производство печатных плат (ПП) предъявляет высокие требования к надежности, долговечности и функциональности конечного продукта. Ключевую роль в обеспечении этих характеристик играют гальванические покрытия. Среди них электрохимическое осаждение никеля занимает одно из центральных мест благодаря уникальному комплексу свойств. Никелевые покрытия применяются как в качестве финишного защитно-декоративного слоя, так и в качестве функционального барьерного и подстилающего слоя для последующего золочения. Актуальность технологии обусловлена растущими потребностями микроэлектроники в создании стабильных контактных поверхностей, устойчивых к коррозии, окислению и механическому износу.

Основные функции никелевого покрытия в печатной плате:

1. Барьерный слой: никель предотвращает диффузию атомов меди (основы проводника) в финишное покрытие (чаще всего золото). Без никелевого барьера медь быстро мигрирует через тонкий слой золота, окисляясь на поверхности, что приводит к резкому увеличению переходного сопротивления контакта и потере паяемости.
2. Механическая прочность: слой никеля существенно увеличивает твердость и износостойкость контактных площадок (например, в разъемах типа «пальцы»), обеспечивая многократное сочленение/расчленение без повреждения покрытия.
3. Защита от коррозии: никель обладает высокой коррозионной стойкостью в атмосферных условиях, надежно защищая медные проводники от воздействия окружающей среды.
4. Выравнивание поверхности: никелевое покрытие позволяет сгладить микронеровности меди, создавая идеально ровную поверхность для нанесения последующих тонких и равномерных покрытий (золото, палладий).
5. Пайка: В некоторых применениях (например, покрытие выводных отверстий) никель сам может выступать как паяемая поверхность, хотя его паяемость уступает олову или серебру и требует использования активных флюсов.

Перед процессом нанесения электрохимического никелевого покрытия проводят предварительную подготовку поверхности (обезжиривание, травление, активация).

Для никелирования применяют сульфатные, хлоридные, сульфаминовые, борфторидные, щавелевокислые и другие электролиты, в которых никель находится в виде двухвалентного катиона. Разработано большое количество составов и режимов осаждения, позволяющих получать осадки никеля с различными физико-химическими свойствами. Чаще всего используют сульфатный электролит Уоттса, так как вещества, которые в него входят, наиболее доступны, он прост в приготовлении и обслуживании [1, 2].

В качестве альтернативы чистому никелю в производстве печатных плат применяется электрохимическое покрытие сплавом олово-никель (примерно 65% Sn / 35% Ni) [3].

Выбор в пользу сплава олово-никель оправдан в случаях, когда требуется совместить функции финишного паяемого покрытия с повышенной механической и коррозионной стойкостью, что позволяет в ряде применений отказаться от дорогостоящего золочения. Однако технология его осаждения предъявляет более строгие требования к процессу [3, 4]: необходимым условием является поддержание стабильных параметров электролита (температура, pH) для обеспечения постоянного состава сплава, а также учет его повышенной хрупкости, ограничивающей применение на гибких платах.

Электрохимическое покрытие никелем и сплавами на его основе остается критически важной и неотъемлемой технологией в производстве высоконадежных печатных плат. Оно обеспечивает непревзойденное сочетание барьерных, механических и защитных свойств, выступая фундаментом для последующих покрытий. Понимание физико-химических основ процесса, строгий контроль параметров и корректный выбор типа покрытия в зависимости от конечного применения являются залогом производства качественной и отвечающей современным требованиям электронной продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капица, М. С. Технология производства печатных плат: учеб. пособие / М. С. Капица, Н. П. Иванова, И. М. Жарский. – Минск: БГТУ, 2005. – 396 с.
2. Медведев, А. М. Технология производства печатных плат / А. М. Медведев. – М.: Техносфера, 2005. – 360 с.

3. Пянко, А.В. Композиционное покрытие олово – никель – диоксид титана / А. В. Пянко [и др.] // Неорганические материалы. – 2019. – Т. 55. № 6. – С. 609–616.

4. Pianka, H. Effects of incorporating TiO₂ aggregates on the growth, anticorrosion, and antibacterial properties of electrodeposited multifunctional coatings based on Sn-Ni materials / H. Pianka [etc.] // *Coatings*. – 2024. – No. 14. – P. 1344–1373. <https://doi.org/10.3390/coatings14111344>

УДК 669-1

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НИЗКОНИКЕЛЕВЫХ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ ТРИП СТАЛЕЙ

П.Л. ЦЫБА¹, С.Н. ЛЕЖНЕВ², Д.В. КУИС³

¹Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

²Рудненский индустриальный университет, Рудный, Казахстан

³Белорусский государственный технологический университет,
Минск, Беларусь

Уже не одно десятилетие в различных отраслях промышленности, особенно в авиа- и автомобилестроении, в связи с растущими требованиями к безопасности, надежности и уменьшению веса элементов конструкции и деталей машин, наблюдается устойчивая тенденция к применению материалов, обладающих высокими показателями не только по прочности, но и одновременно по пластичности. Конструкционные элементы из обычных сталей повсеместно заменяются на пластики и композиты, а облегченные силовые элементы конструкций на высокопрочные стали с требованием повышенной пластичности, чтобы при аварии происходило не хрупкое разрушение, а управляемое смятие прочного силового каркаса с адсорбированием большей энергии удара за счет повышенной прочности и достаточной пластичности материала. Как известно большинство традиционных способов повышения прочностных характеристик металлоизделий, такие как термообработка; деформационное упрочнение, и в частности способами обработки давлением, реализующими в процессе деформирования интенсивные пластические деформации; термомеханическая обработка, в большинстве случаев приводят к снижению пластических свойств материалов данных металлоизделий. При производстве различных металлоизделий ответственного назначения данная проблема в настоящее время частично решена

применением стали с остаточным аустенитом, известная в международной практике как ТРИП сталь. Эта сталь имеет многофазную структуру, состоящую из феррита, бейнита, остаточного аустенита и мартенсита. Главной особенностью данного материала является присутствие в микроструктуре данного материала метастабильного аустенита и наличие так называемого ТРИП-эффекта, который проявляется в трансформации кубической гранецентрированной решётки аустенита в объемно-центрированную решётку мартенсита в результате коллективного сдвига плоскостей при приложении нагрузки. Именно данная особенность ТРИП сталей существенно влияет на комплекс их механических свойств и позволяет добиться, как повышения прочностных, так и пластических свойств.

Одной из основных причин отсутствия широкого промышленного применения данных сталей является высокая стоимость их производства, так как они все высоколегированные. Поэтому в настоящее время перед учеными и производителями ТРИП сталей стоит задача по разработке новых низколегированных марок сталей, в том числе и ТРИП сталей, обладающих все тем же повышенным уровнем механических свойств. В частности этой проблемой занимаются ученые Института черной металлургии Технического университета - Фрайбергская горная академия (TUBAF). Начиная с 2020 года по настоящее время в академии реализуется проект №44797210 «Alloy and structure design of austenitic cast Cr-Ni-Cu-N steel exhibiting TRIP/TWIP properties for cold massive forming», который финансируется Немецкой исследовательской ассоциацией. Так же в академии проводятся и инициативные исследования в области выплавки, обработки и исследования структуры и свойств экономнолегированных аустенитных сталей различного химического состава. По полученным в рамках проводимых исследований результатам ими был опубликован целый ряд научных работ в данном направлении, в том числе работы [1-8]. При этом одно из направлений, проводимых в Институте черной металлургии TUBAF исследований, связано с выплавкой и исследованием новых никельсберегающих метастабильных ТРИП сталей. В первую очередь это связано с тем, что высокое содержание никеля значительно повышает стоимость стали [9, 10]. Также надо отметить, что по данным ВОЗ, никель - один из наиболее опасных загрязнителей окружающей среды. Повышенное содержание никеля в окружающей среде (согласно классификации Международного агентства исследований рака (IARC) металлический никель (пыль) и гипосульфит никеля являются канцерогенами и опасны в концентрациях 0,0004–0,4 и 0,0001–0,1 мг/м³, соответственно [11]) приводит к появлению эндемических заболеваний, бронхиального рака.

Другой немаловажной нишей применения безникелевых высокопрочных сталей является ядерная энергетика и перспективные термо-ядерные энергетические установки [12]. Никель при облучении нейтронами распадется очень токсичные и долгоживущие изотопы [13]. При среднем содержании никеля в 10% в типичных сталях, применяемых для конструкций самого корпуса реактора и трубопроводов близких к активной зоне, проблема наведенной радиоактивности этих деталей, составляющих основу реактора, очень велика [14-15]. И если, с более известной проблемой утилизации и переработки самого ядерного топлива (например, в МОХ-топливо [15]) все относительно просто, то, что делать с многотонными массивными корпусами реакторов не вполне ясно. Эта, ранее незаметная проблема, будет только нарастать с растущей декомиссией старых энергоблоков, массово построенных в 70-е и 80-е годы. Получение нового класса безникелевых реакторных сталей позволит приблизиться к решению утилизации корпусов реакторов.

На основе выше сказанного можно сделать вывод, что исследования в области выплавки и последующей деформационной обработки низконикелевых метастабильных ТРИП сталей до сих пор являются актуальными исследованиями. Так как данные (никельсберегающие метастабильные) ТРИП стали с каждым годом будут находить все более широкое применение в различных отраслях промышленности, в том числе они могут найти свое применение и при производстве беспилотных аппаратов.

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № AP26100119).

ЛИТЕРАТУРА

1. Schröder C., Wendler M., Volkova O., Weiß A. Microstructure and mechanical properties of an austenitic crmnimon spring steel strip with a reduced ni content// Crystals, 10 (2020), 392.
2. Günther J., Lehnert R., Wagner R., Burkhardt C., Wendler M., Volkova O., Biermann H., Niendorf T. Effect of compositional variation induced by EBM processing on deformation behaviour and phase stability of austenitic Cr-Mn-Ni TRIP steel// JOM, 72 (2020), 1052-1064.
3. Quitzke C., Huang Q., Biermann H., Volkova O., Wendler M. Influence of C and N on strain-induced martensite formation in Fe-15Cr-7Mn-4Ni-0.5Si austenitic steel// Materials, 14 (2021), 6502.
4. Alsultan S., Quitzke C., Cheng Z., Krüger L., Volkova O., Wendler M. Strain-induced martensite formation and mechanical properties of Fe-

19Cr-4Ni-3Mn-0.15N-0.15C austenitic stainless steel at cryogenic temperature// Steel Research Int., (2021), 2000611.

5. Schröder C., Volkova O., Wendler M. Influence of strain rate on the tensile properties of metastable austenitic stainless CrNi and CrMnNi spring steels// Materials Science and Engineering: A, 850 (2022), 143507.

6. Scherbring S., Chen G., Veltel B., Bartzsch G., Richter J., Vollmer M., Blankenburg M., Shyamal, Volkova O., Niendorf T., Lienert U., Sahu P., Mola J. Microstructural constituents and mechanical properties of low-density Fe-Cr-Ni-Mn-Al-C stainless steels// Materials, 15 (2022), 5121.

7. Hauser M., Volkova O., Wendler M. Modelling of mechanical properties of metastable austenitic Cr-Mn-Ni steels with TRIP effect// Steel Research Int., (2023), 2300058.

8. Nitzsche P., Hauser M., Lehnert N., Weidner A., Henkel S., Wendler M., Freudenberger J., Volkova O., Kräusel V., Biermann H. Quasi-static tensile and fatigue behaviour of a metastable austenitic stainless Cr-Ni-Cu-N steel// Theoretical and Applied Fracture Mechanics, (2024), 104571.

9. Tensile and impact properties of low nickel maraging steel/ Sha W., Chen Z., Geriletu X. [et al.] // Materials Science and Engineering A, 2013. V.587. - P. 301–303.

10. Sibanda M., Vismer S. L., Knutsen R. D. Consideration of reduced nickel containing austenitic stainless steels for forming applications// Materials Letters. 1994. V.21. № 2. - P. 203–207.

11. Дерябина В.И., Акользина Т.В., Нохойжав Гэрэлтуяа. Новые подходы к определению никеля методом вольтамперометрии// Фундаментальные исследования. 2013. № 8 (часть 3). – С. 590-594.

12. Structural materials for heavy liquid metal cooled fast reactors/ Серия TECDOC. - Вена: Международное агентство по атомной энергии, 2021. - 252 с.

13. Pavliuk A.O., Kotlyarevskiy S.G., Bespala E.V., Zakharova E.V., Ermolaev V.M., Volkova A.G. Experience of on-site disposal of production uranium-graphite nuclear reactor // Journal of Environmental Radioactivity, 2018. T. 184–185. - P. 22–31.

14. El Mokhtari B., Chetaine A., Amsil H., Embarch K., Benchrif A., Laraki K., Marah H. Modeling and simulating the induced effect on the steel collimator plug used in the PGAA Facility of the moroccan TRIGA Mark-II reactor under different neutron irradiation levels// Applied Radiation and Isotopes. 170 (2021), 109620.

15. Mixed oxide fuel (MOX) exploitation and destruction in power reactors/ Merz E.R., Walter C.E., Pshakin G.M. - Dordrecht: Springer Netherlands, 1995. - 349 p.

16. IAEA waste from innovative types of reactors and fuel cycles: A Preliminary Study / Серия по ядерной энергии МАГАТЭ. - Вена: Международное агентство по атомной энергии, 2019. - 148 с.

ЗАЩИТНЫЕ КОНВЕРСИОННЫЕ ФОСФАТНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА СПЛАВАХ МАГНИЯ

А.А. ШИРВЕЛЬ, А.В. ПОСПЕЛОВ, М.В. ДЯДЕНКО

Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

Среди конструкционных материалов промышленного назначения магний и его сплавы являются самыми легкими, характеризуются высокими удельными прочностью и теплоемкостью, отличной обрабатываемостью резанием, способностью поглощать энергию вибрационных колебаний и удара. При легировании плотность сплавов магния может снижаться до $1,3 \text{ г/см}^3$, а удельный модуль упругости больше, чем у стали. Благодаря этим свойствам сплавы магния находят все большее применение для повышения жесткости и уменьшения массы отдельных некритических узлов деталей машин. Использование материалов на основе магния при изготовлении беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) позволяет, прежде всего, увеличить пластичность конструкционных материалов, а за счет снижения веса отдельных деталей – существенно увеличить время полета и полезную нагрузку аппаратов.

Одной из главных проблем производства и использования металлических конструкционных материалов на основе магния и его сплавов является их подверженность коррозионному разрушению. По различным данным годовые потери металла от коррозии в мире составляют около 30 % от его производства и оцениваются суммой порядка 2,5 трлн. долл. США, достигая в некоторых странах 3–5 % ВВП. Правильный выбор и применение доступных методов антикоррозионной защиты позволяют снизить расходы, связанные с коррозией на 15–35 %, а также повысить безопасность и надежность эксплуатации металлоконструкций.

Для решения проблемы повышения коррозионной устойчивости предложены две основные стратегии: оптимизация химического и фазового состава сплавов с использованием различных легирующих элементов, а также модификация поверхности путем создания функциональных покрытий. Для магниевых сплавов более предпочтительной является химическая и/или механическая модификация поверхности, что обусловлено легкостью обработки и дешевизной используемых материалов и реагентов [1]. Обработка магниевых сплавов методом нанесения на поверхность конверсионных фосфатных покрытий позволяет использовать их в качестве силовых элементов планера, корпуса и кронштейна.

Целью исследования было изучение влияния процесса фосфатирования на коррозионное поведение образцов магниевого сплава AZ91 в модельном хлоридсодержащем растворе.

Объектом исследования являлся легированный алюминием, марганцем и цинком магниевый сплав AZ91. Фосфатирование предварительно подготовленных образцов проводили методом погружения в раствор следующего состава, моль/дм³: Ca(NO₃)₂ – 0.4; H₃PO₄ – 0.2 (pH 3.2). Проведенные исследования показали, что наиболее качественные однородные покрытия формируются при температуре электролита фосфатирования 70° С и продолжительности процесса 60 минут.

Исследование коррозионных свойств образцов магниевых сплавов проводили методами линейной вольтамперометрии и электрохимической импедансной спектроскопии на потенциостате/гальваностате AUTOLAB PGSTAT 302N в растворе, содержащий 8 г/дм³ NaCl (pH=7,4).

На рисунке 1 представлены поляризационные кривые образцов сплава AZ91 до (а) и после (б) фосфатирования в хлоридсодержащем растворе, а в табл. 1 приведены результаты электрохимических параметров коррозии, рассчитанные по данным линейной вольтамперометрии.

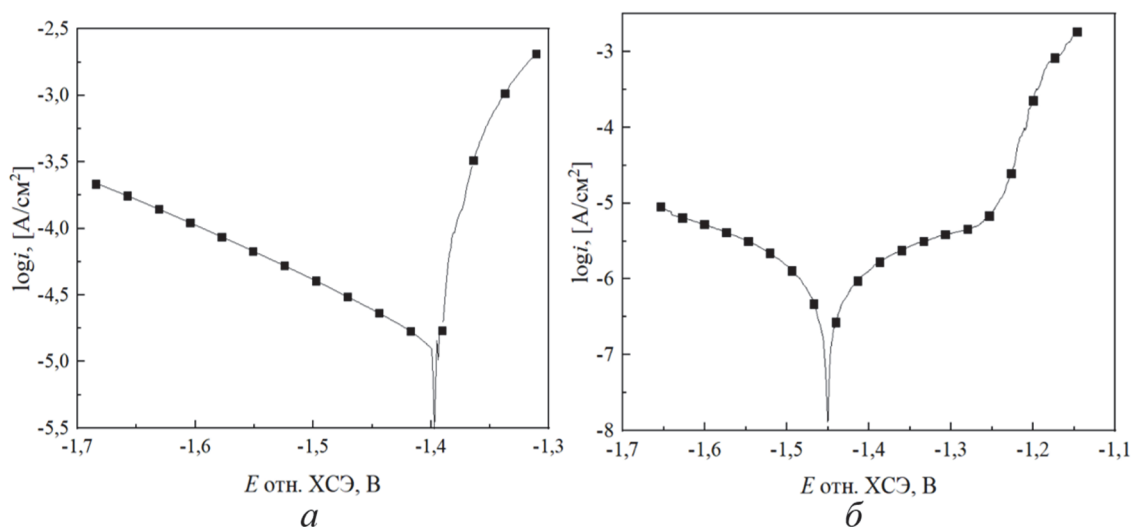


Рис. 1 – Поляризационные кривые, снятые в модельном хлоридсодержащем растворе, образцов сплава магния AZ91 до (а) и после фосфатирования (б)

Табл. 1 – Электрохимические параметры коррозии образцов сплава магния AZ91 в хлоридсодержащем растворе

Образец	a_a , В	b_a , В	a_k , В	$ b_k $, В	$i_{кор}$, мкА/см ²	$E_{кор}$, В
исходный	-1,34	0,01	-2,45	0,217	13,3	-1,39
после фосфатирования	0,10	0,26	-2,68	0,21	1,45	-1,45

Как видно из представленных данных, смещение потенциала от его стационарного значения в катодную область приводит к монотонному возрастанию плотности тока, что объясняется интенсификацией процесса выделения водорода. При этом катодная ветвь поляризационной кривой исходного сплава AZ91 линейна в широком интервале потенциалов и характеризуется углом наклона 217 мВ. Анодная поляризация образца приводит к существенной интенсификации электродных процессов. Анодная ветвь тафелевских кривых сплава AZ91 характеризуется углом наклона 10 мВ. При этом углы наклона катодных и анодных ветвей поляризационной кривой фосфатированных образцов магниевого сплава различаются между собой. На анодной ветви поляризационной кривой образца сплава AZ91 присутствуют два участка: активно-пассивная область и область активного растворения. Излом на анодной ветви, который соответствует значению потенциала $-1,25$ В, характеризует потенциал пробоя. Угол наклона анодной ветви поляризационной кривой в активно-пассивной области составляет 210 мВ, а катодной ветви – 260 мВ.

Согласно полученным данным, плотность токов коррозии нефосфатированного образца сплава AZ91 составляет $13,3$ мкА/см². Фосфатирование магниевых сплавов способствует снижению плотности тока коррозии более, чем в 9 раз. При этом значение плотности тока коррозии снижается до $1,45$ мкА/см².

На рисунке 2 представлены полученные в растворе хлорида натрия спектры импеданса в виде диаграммы Найквиста сплава магния AZ91 до (а) и после (б) фосфатирования, а в таблице 2 приведен подбор параметров соответствующей им эквивалентной схемы.

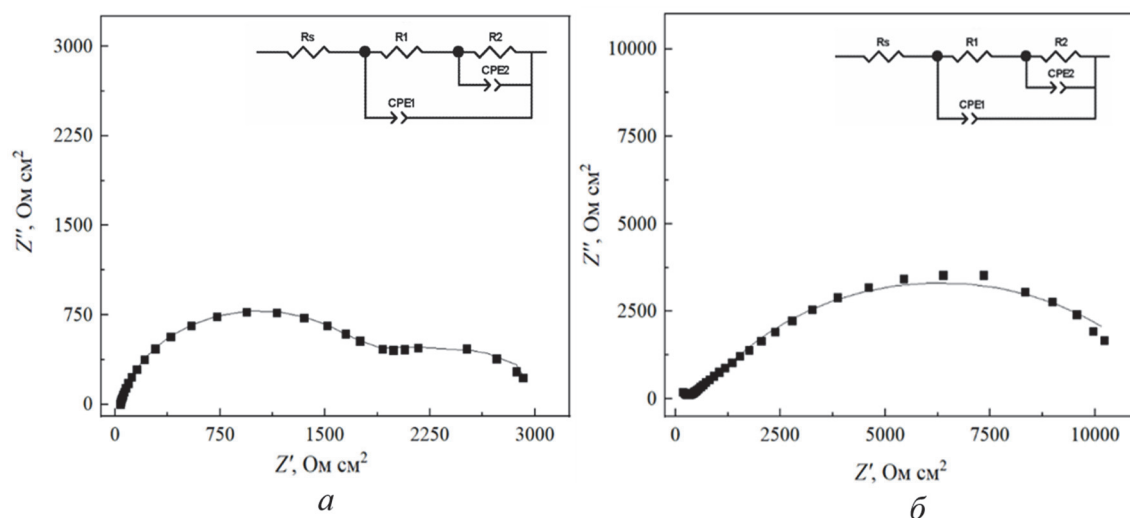


Рис. 2 – Спектры импеданса в виде диаграммы Найквиста в растворе хлорида натрия и соответствующая эквивалентная схема образцов сплава магния AZ91 до (а) и после фосфатирования (б)

На спектрах импеданса наблюдается наличие двух временных констант: полуокружность в области высоких и средних частот и полуокружность в области низких частот. Согласно полученным результатам, поляризационное сопротивление (R_p) фосфатированных образцов сплава AZ91 составляет $11813 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$, что соответственно в 3,97 раза больше по сравнению с поляризационным сопротивлением образцов без фосфатного покрытия ($R_p=3000 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$). Результаты электрохимической импедансной спектроскопии согласуются с представленными выше результатами линейной вольтамперометрии.

Табл. 2 – Подбор параметров эквивалентной схемы

Образец	$R_s, \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$	$R_1, \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$	$\text{CPE}_1, \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^n$	n_1	$R_2, \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$	$\text{CPE}_2, \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^n$	$R_p, \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$
исходный	35,69	1918	$1,58\cdot 10^{-5}$	0,86	1082	$8,8\cdot 10^{-4}$	3000,0
после фосфатирования	224,6	886	$5,71\cdot 10^{-6}$	0,62	10927	$8,823\cdot 10^{-6}$	11813

Таким образом, проведенные исследования показали, что нанесение на магниевые сплавы серии AZ конверсионных фосфатсодержащих покрытий приводит к снижению почти на порядок токов коррозии образцов и увеличению примерно в 4 раза поляризационного сопротивления поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Atrens A. et al. Review of Mg alloy corrosion rates //Journal of magnesium and alloys. – 2020. – Vol. 8. – №. 4. – P. 989–998.

IV СЕКЦИЯ

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ
БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ. ИСТОЧНИКИ
ПИТАНИЯ, ДВИГАТЕЛИ, ПРИВОДЫ,
ЭЛЕКТРОНИКА, ПОДВЕСНОЕ
ОБОРУДОВАНИЕ И МОДУЛИ**

УДК 621.9

**ПОДГОТОВКА ПРОФИЛЬНЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ
В КОНТЕКСТЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БПЛА**

А.В. БЛОХИН, С.Е. БЕЛЬСКИЙ, А.И. СУРУС,
М.Н. ПИЩОВ, А.М. ЛОСЬ

Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

Проектирование и конструирование беспилотных аппаратов – поле деятельности инженера-конструктора, специалиста, осуществляющего инженерный поиск на стыке авиационной инженерии, робототехники и программирования, способный воплощать самые смелые идеи в летающие прототипы [1].

В ходе своей профессиональной деятельности названные специалисты должны уметь решать целый спектр задач:

- проектирование и конструирование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с учетом самых разных факторов, в том числе – аэродинамических свойств;
- тестирование прототипов и предсерийных изделий, выявление узких мест в конструкции и внесение в нее корректировок;
- грамотное использование существующих и разработка новых электронных систем, отвечающих за управление, стабилизацию навигацию и т.п.;
- разработка программного обеспечения для управления БПЛА во всех режимах полета;

- интеграция в конструкцию специализированного оборудования;
- решение вопросов, связанных с оптимизацией энергопотребления, увеличения времени и дальности полета [1].

Для решения поставленных задач специалисты в области проектирования и конструирования БПЛА должны обладать целым перечнем навыков и компетенций. К наиболее важным из них, по данным [1], можно отнести:

- знание общих принципов конструирования, механики, сопротивления материалов и аэродинамики;
- знания в области материаловедения на уровне понимания свойств и технологии композиционных и полимерных материалов, сплавов на основе металлов;
- профессиональное владение программами автоматизированного проектирования (КОМПАС-3D, Solidworks);
- владение основами электроники и схемотехники на уровне понимания принципов датчиков, микроконтроллеров, схем силового управления двигателями и т.п.;
- знание основ программирования, позволяющие производить разработку и отладку программного обеспечения для управления БПЛА в различных режимах работы.

Кроме этого, конструкторы и проектировщики БПЛА должны обладать навыками прототипирования и 3D-печати различными материалами для оперативного изготовления деталей и изделий, а также целый перечень личностных качеств: умение работать в команде, внимание к деталям в проектировании (конструировании), обладать аналитическим мышлением и способностью решать комплексные проблемы и др. [1].

Для обеспечения качественной подготовки специалистов-проектировщиков (конструкторов) БПЛА требуется наличия существенной материальной базы в учебных организациях, определяемой в основном собственно наличием БПЛА различных типов, широкого перечня отдельных узлов, несущих элементов, двигателей, контроллеров и т.п. Это позволит обеспечить практическое изучение стадий жизненного цикла летательного аппарата с непосредственным личным участием обучающегося, обеспечит связь полученных теоретических знаний с практическим воплощением в металле, пластике, в реальном объекте, что даст возможность накапливаться профессиональному опыту ещё до практической деятельности на промышленном предприятии [2].

В тоже время, авторы [1] считают, что для успешной подготовки специалиста в области проектирования и конструирования БПЛА в качестве фундамента важно иметь общее высшее образование в одной из следующих областей: авиационная и ракетно-космическая техника; электроника и робототехника; мехатроника и робототехнические системы; программная инженерия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Skypro [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.sky.pro/wiki/profession/inzhener-konstruktor-dronov-trebovaniya-nauki-i-perspektivy/>. – Дата доступа 12.09.2025.
2. Лукьянов О.Е., Золотов Д.В. Методологическое обеспечение подготовки проектантов и операторов беспилотных летательных аппаратов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20, № 1. С. 14-28.

УДК 623.746.4-519

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Д.Н. БОРОВСКИЙ, В.И. КОЗЛОВСКИЙ, ЦЗИЮЙ ЧЕНЬ
Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) стали неотъемлемой частью современной технологической экосистемы, находя применение в различных отраслях – от сельского хозяйства и логистики до безопасности и обороны. Проектирование БПЛА представляет собой сложный междисциплинарный процесс, требующий учета множества факторов, включая технические требования, нормативные ограничения и рыночные потребности. БПЛА по сравнению с пилотируемыми летательными аппаратами отличаются относительно низкой стоимостью, несложной технологией изготовления, не требуют применения аэродромов к тому же современная электроника позволяет автоматически строить точную траекторию движения аппарата.

Проектирование БПЛА – это сложный процесс, который включает несколько взаимосвязанных этапов. Каждый из них требует глубоких знаний в области авиации, электроники, материаловедения и программного обеспечения.

Компьютерное моделирование стало неотъемлемой частью современного процесса проектирования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Оно позволяет инженерам и разработчикам создавать, тестировать и оптимизировать конструкции дронов в виртуальной среде, значительно сокращая время и затраты на физическое прототипирование.

В условиях быстроразвивающегося рынка БПЛА, где ключевыми факторами являются эффективность, безопасность и функциональность, компьютерное моделирование предоставляет инструменты для решения сложных инженерных задач. В этой статье рассматриваются основные методы, инструменты и перспективы компьютерного моделирования при проектировании БПЛА, а также его влияние на развитие индустрии.

Процесс компьютерного моделирования при проектировании БПЛА включает несколько ключевых этапов, каждый из которых направлен на решение специфических задач и обеспечение оптимальных характеристик летательного аппарата.

На начальном этапе разработчики определяют основные требования к БПЛА, такие как грузоподъемность, дальность полета, автономность и условия эксплуатации. Компьютерное моделирование позволяет:

- проводить предварительные аэродинамические расчеты;
- оценивать устойчивость и управляемость аппарата;
- выбирать оптимальную конструкцию (мультикоптер, самолетного типа, гибридную) на основе математических моделей;

На следующем этапе – разработка и оптимизация конструкции, проводится компьютерное моделирование для:

- создания цифровых двойников БПЛА, которые точно отражают физические характеристики реальных аппаратов;
- проведения виртуальных испытаний в аэродинамических трубах и других средах;
- оптимизации геометрии и материалов для снижения веса и повышения прочности.

Использование суперкомпьютерных вычислительных технологий с применением методов численного моделирования и виртуального прототипирования позволяет в несколько раз сократить процесс разработки и производства.

На третьем этапе моделируют системы управления и навигации, которые являются критически важными компонентами БПЛА. Здесь компьютерное моделирование позволяет разрабатывать и тестировать алгоритмы автономного полета, моделировать работу датчиков (камер, лидаров, IMU, GPS) в различных условиях, а также оценивать влияние внешних воздействий, таких как ветер, турбулентность и осадки, на стабильность полета.

На завершающем этапе компьютерное моделирование используется для комплексного тестирования всех систем БПЛА в симуляционной среде, оценки производительности и надежности аппарата в условиях, близких к реальным и подготовке к физическому прототипированию и сертификации.

Для компьютерного моделирования при проектировании БПЛА используется широкий спектр специализированного программного обеспечения, которое позволяет решать различные инженерные задачи:

1) *Симуляция полетов и управления.* Основным программным пакетом является UAV Toolbox, который предоставляет инструменты для проектирования, моделирования, тестирования и развертывания приложений для БПЛА. Этот инструмент позволяет разрабатывать автономные алгоритмы полета, полетные контроллеры и планировать миссии. Ключевые особенности:

- моделирование сценариев БПЛА в 3D-среде с использованием Unreal Engine для фотореалистичной визуализации;
- генерация синтетических данных с камер, лидаров, IMU и GPS-датчиков;
- анализ журналов полетов;
- поддержка протокола MAVLink для связи с оборудованием БПЛА и развертывания на целевых платформах.

2) *Фотограмметрия и картографирование.* Компьютерное моделирование используется для обработки данных, полученных с БПЛА, создания 3D-моделей и картографирования.

3) *Разработка 3D-модели БПЛА и его прототипирование.* Программное обеспечение позволяет:

- создавать и редактировать 3D-модели деталей БПЛА;
- разрабатывать чертежно-конструкторскую документацию;
- проводить расчет и анализ оптимальных конструктивных параметров летательных аппаратов и анализ аэродинамических характеристик БПЛА;
- подготавливать модели для 3D-печати и прототипирования.

Несмотря на значительные успехи, компьютерное моделирование при проектировании БПЛА сталкивается с рядом проблем, таких как:

- вычислительная мощность. Моделирование сложных систем и условий требует значительных вычислительных ресурсов, что может быть дорого и времязатратно;
- точность виртуального моделирования. Обеспечение точности и достоверности моделей остается сложной задачей, особенно при моделировании внешних воздействий, таких как турбулентность или электромагнитные помехи;
- интеграция с реальными системами. Переход от виртуальных моделей к физическим прототипам требует тщательной проверки и валидации.

Компьютерное моделирование играет главнейшую роль в современном проектировании БПЛА, позволяя инженерам создавать более эффективные и инновационные летательные аппараты. Оно позволяет

значительно сократить время и затраты на разработку, а также улучшить характеристики БПЛА. С развитием вычислительных технологий, искусственного интеллекта и новых материалов, компьютерное моделирование будет продолжать эволюционировать, открывая новые возможности для создания БПЛА. Однако для достижения максимального потенциала необходимо решить такие проблемы, как вычислительная мощность современного компьютерного оборудования и обеспечение точности виртуальных моделей.

УДК 62.52

ПОДАВЛЕНИЕ ПОМЕХ В СИСТЕМАХ СТАБИЛИЗАЦИИ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

**Д.А. ГРИНЮК, Н.М. ОЛИФЕРОВИЧ, И.Г. СУХОРИКОВА,
Е.С. АНДРУХОВИЧ**

Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

В настоящее время разработано множество решений, направленных на улучшение динамики регулирования путем интеграции элементов ускоренного реагирования в структуру ПИД-регулятора, что позволяет учитывать разницу между выходным сигналом измерительного преобразователя и заданным сигналом. Однако классическое ПИД-регулирование сталкивается с проблемой обеспечения быстродействия при высоком уровне шумов в измерительном канале. Эта проблема усугубляется процессом преобразования аналогового сигнала в цифровой в устройствах регулирования. В результате многие стандартные алгоритмы ПИД-регулирования включают различные встроенные решения для сглаживания данных от измерительных устройств. Например, некоторые из них используют фильтр низкой частоты (ФНЧ) первого порядка, который в аналоговых устройствах реализуется с помощью резисторов и конденсаторов, а в цифровых — через цифровую реализацию ФНЧ или фильтр скользящего среднего.

Как указывают авторы большинства исследований, посвященных решению проблемы шумов в измерительном канале, параметры фильтра оказывают влияние на оптимальные настройки ПИД-регулятора. Однако использование фильтра всегда приводит к временной задержке, что негативно сказывается на общей динамике управления. Увеличение

порядка фильтра, даже с применением простоты настройки фильтра Баттерворта, не решает проблему ухудшения динамики.

В прикладных исследованиях предлагаются простые подходы для выбора постоянной времени фильтра. Другие исследователи сосредоточены на разработке критериев и алгоритмов для совместной или последовательной настройки этих двух динамических элементов в системе управления. Однако последовательная настройка не позволяет достичь оптимальных характеристик, тогда как совместная настройка требует значительных вычислительных ресурсов для поиска множества параметров.

Выбор критерия для настройки параметров систем представляет собой сложную задачу, и универсального решения здесь не существует. Шум в измерительном канале усугубляет различные проблемы регулирования. Потребность в подавлении шумов может возникнуть из стремления обеспечить минимальные отклонения на выходе для технологических процессов, что особенно актуально для динамических задач. В ситуациях с высокой инерционностью объекта он сам выполняет роль сглаживающего фильтра, и наличие шумов в измерительном тракте может приводить к динамическим колебаниям исполнительных устройств, что снижает их надежность. При этом специфика таких динамических объектов заключается в том, что стремление повысить быстродействие системы приводит к значениям времени дифференцирования, значительно превышающим 1, что многократно увеличивает амплитуду шумов в сигнале управления исполнительным механизмом. В каждом из этих двух случаев критерии будут различаться. Если рассматривать интегральные критерии, то в первом случае можно рекомендовать критерии вида [1]:

$$I_{10} = \int_0^{tm} t^n |e(t)| dt; \quad (1)$$

$$I_{12} = \int_0^{tm} t^n e(t)^2 dt, \quad (2)$$

где $e(t) = (SP - y)$ – сигнал ошибки между сигналом задания и выходным сигналом; SP – сигнал задания; y – выходное значение замкнутой системы; t – время; tm – время моделирования; n – показатель штрафа, который в зависимости от целей может иметь значение 0, 1, 2,

Когда надежность работы исполнительного механизма является первоочередной задачей, то лучше использовать критерии вида [2]

$$I_{20} = \int_0^{tm} t^n (c|e(t)| + d|u(t)|) dt; \quad (3)$$

$$I_{21} = \int_0^{tm} (ce(t)^2 + du(t)^2) dt; \quad (4)$$

где c, d – коэффициенты перераспределения влияния $\mu(t)$ и $e(t)$ на результат настройки; $u(t)$ – сигнал управления с регулятора или разница между текущим сигналом управления и его стационарным значением.

Коэффициенты c и d обычно принимают одинаковыми.

Следует отметить, что интегральные критерии не являются единственным показателем, который используется для поиска оптимальных параметров ПИД-регулятора.

Управляемый ограничитель является нелинейным прибором, поэтому эффективность места его установки во многом зависит от целей и динамики объекта управления.

Если необходимо снизить уровень шумов не только для повышения надежности работы исполнительного механизма, но и для удобства мониторинга технических параметров, следует размещать фильтр управления выходом (ФУО) после измерительного преобразователя [2]. Если требуется обеспечить простой режим работы исключительно для исполнительного механизма, ФУО можно установить уже после вычисления ошибки. Одним из вариантов может быть установка управляемого ограничителя после усиления сигнала ошибки, особенно если коэффициент усиления регулятора значительно превышает 1. Это улучшит его функционирование, поскольку всегда существуют ограничения, связанные с цифровой обработкой данных. В качестве альтернативы можно использовать ФУО только для пропорциональной и дифференциальной составляющих регулятора, так как интегральная часть сама по себе эффективно снижает влияние шума. Фильтрацию с использованием управляемого ограничителя целесообразно проводить только для контура обратной связи, так как он может вносить значительные нелинейные искажения в измерительный канал. Для контроля параметров лучше применять традиционные методы фильтрации.

Может быть предложено несколько вариантов структур управляемого ограничителя (рис. 1), в которых коэффициент a формирует некоторое компромиссное значение между уровнем снижения амплитуды помех и временными задержками.

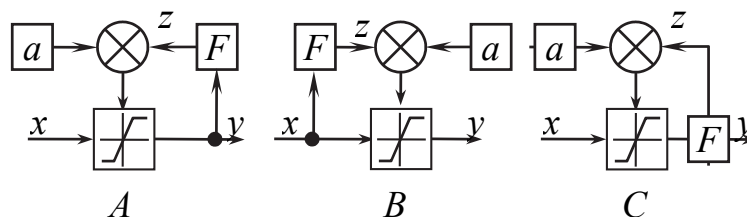


Рис. 1. Структуры ФУО: F – сглаживающий фильтр; z – сигнал после фильтра

Для выбора критерия настройки была произведена настройка данной структуры по различным интегральным критериям [].

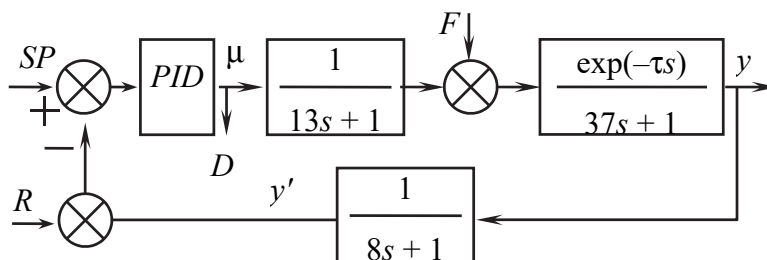


Рис. 2. Структура объекта исследования: y' – сигнал датчика, s – оператор передаточной функции в преобразовании Лапласа

После получения параметров настройки ПИД-регулятора по интегральным критериям были определены параметры статических и динамических ФОУ. Настройка статического ФОУ представляет собой поиск компромисса. Уменьшение параметров приводит к снижению дисперсии, но одновременно ухудшает динамические характеристики регулирования. Возникает необходимость увеличивать параметр a при наличии трендовой динамики. Как было указано ранее и исследовано в работе [2], применение фильтра высокой частоты является одним из возможных решений. Использование данной структуры привело к сокращению времени переходного процесса и снижению дисперсии [1]. Динамическое изменение уровня ограничения позволило уменьшить чувствительность к настроечным параметрам.

Время переходного процесса для ДФОУ в целом улучшилось, хотя и не значительно, тогда как снижение дисперсии оказалось существенным на несколько порядков. Вариантам управления а может быть использование аппроксимации [4]

Еще лучшие результаты продемонстрировало применение каскадное использование ФОУ. В данной работе был проверен вариант с двумя управляемыми ограничителями.

Применение сложных многопараметрических алгоритмов поиска может обеспечить одновременную оптимизацию параметров ПИД-регулятора и ДФОУ, что приведет к повышению эффективности. Однако такое решение имеет больше теоретическую основу. При оптимизации с учетом случайной составляющей возможно возникновение множества локальных экстремумов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гринюк Д. А., Олиферович Н. М, Сухорукова И. Г. и др. Уменьшение влияния помех измерительного канала на замкнутую систему регулирования // Труды БГТУ. Сер. 3. 2023. № 2 (261). С. 58-70.

2. Моделирование и настройка систем с нелинейной динамикой / Д. А. Гринюк [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2021. № 2 (248). С. 65–71.

3. Оптимизация параметров фильтра с управляемым ограничителем для слабых сигналов / Д. А. Гринюк [и др.] // Наука и Техника. 2003. № 5. С. 32–34. DOI: 10.21122/2227-1031-2003-0-5-32-34.

4. Гринюк Д. А., Олиферович Н. М., Сухорукова И. Г. Использование алгоритмов аппроксимации для сглаживания трендов измерительных преобразователей // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2017. № 2 (200). С. 82–87.

УДК 53.083

ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ

**Д.А. ГРИНЮК, Н.М. ОЛИФЕРОВИЧ,
Т.А. ДЕЙНЕКА, Г.А. КУСТОВ**

**Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь**

При построении беспилотных аппаратов информационные потоки обусловлены тремя типами данных: видеопоток, телеметрия и вспомогательная информация [1]. Основной задачей обработки видеосистемы БПЛА является кодирование исходной картинки в более плотный объем информации для передачи операторам или сохранения на носителях для последующего анализа [2]. Телеметрические данные – это данные с датчиков GPS или IMU (ИНС, инерциальной навигационной системы). Эти данные участвуют или в автономном управлении или опять же предоставляются оператору. Они отображаются с помощью специальной опорной схемы с формальным оформлением. Очень часто для повышения качества пилотирования используются опорные изображения USGS DEM (цифровая высотная сетка) и USGS DOQQ (цифровой ортофотоплан Quarter Quadrangle). Они различаются как по структуре, так и по определению должны быть совместно зарегистрированы, чтобы можно было выполнить интеллектуальную оценку 3D GCPS (глобальной климатической системы).

Каждый из этих датчиков выполняет свою уникальную роль и в совокупности они обеспечивают надежную работу БПЛА в различных условиях и для различных задач.

Для управления БПЛА применяют большой класс датчиков:

- Гироскопы нужны для измерения угловую скорость, контроля ориентации БПЛА и стабилизации аппарата во время полета;
- Акселометры измеряют линейное ускорение и помогают определить положение БПЛА относительно земли. В сочетании с гироскопами они обеспечивают более точную навигацию;
- GPS-датчики (или IMU) используются для определения местоположения БПЛА и навигации;
- Барометры еще один датчик для навигации, который по давлению позволяет определять высоту полета БПЛА;
- Магнитометры используются для определения направления относительно магнитного поля Земли;
- Ультразвуковые датчики предназначены для измерения расстояние до поверхности земли или других объектов. Полезны для предотвращения столкновений и обеспечения безопасного приземления.
- Датчики скорости измеряют скорость БПЛА относительно воздуха или земли. Это важно для управления полетом и поддержания стабильности.
- LIDAR (лазерные дальномеры) используются для создания трехмерных карт местности и определения расстояний до объектов с высокой точностью.
- Датчики колебаний необходимы для измерения вибраций и колебаний, что может помочь в диагностике состояния БПЛА и его компонентов.
- Датчики столкновений используют различные технологии (например, инфракрасные или радиочастотные) для обнаружения препятствий и предотвращения столкновений.

Для сбора полезной информации можно выделить следующие источники и технические устройства.

Видеокамеры или RGB-датчик. Существует множество серий RGB-камер, доступных в продаже, и они используются для различных применений. Существует несколько общих параметров для выбора RGB-камер:

- *Разрешение.* Чем выше разрешение камеры, тем более детализированное изображение она будет передавать. Для большинства задач оптимальными являются камеры с разрешением от 1080p до 4K;
- *Частота кадров.* Высокая частота кадров (например, 60 fps и выше) обеспечивает плавность видео;
- *Тип сенсора;*
- *Угол обзора;*
- *Стабилизация изображения.* Оптическая или электронная стабилизация поможет уменьшить дрожание и размытость изображения,

особенно при полетах на высокой скорости или в ветреную погоду;

- *Вес и размер.* Камера должна быть легкой и компактной, чтобы не перегружать БПЛА и не снижать его маневренность;

- *Энергетическая эффективность.* Важно учитывать, сколько энергии потребляет камера, чтобы не сокращать время полета БПЛА;

- *Внешние условия.* При эксплуатации в условиях низких температур температурный диапазон работы может повлиять на выбор;

- *Качество записи в условиях низкой освещенности.* Если планируется использование в условиях плохого освещения, стоит обратить внимание;

- *Наличие дополнительных функций.* Некоторые камеры могут иметь функции, такие как Wi-Fi или Bluetooth для передачи данных, возможность записи в разных форматах, наличие встроенного микрофона и т.д;

- *Совместимость с БПЛА.* Убедитесь, что выбранная камера совместима с вашим БПЛА по креплению и интерфейсу подключения.

- *Цена.* Определите бюджет и найдите оптимальное соотношение цены и качества, учитывая все вышеуказанные параметры.

- *Отзывы и репутация производителя.* Изучите отзывы пользователей и репутацию производителя, чтобы убедиться в надежности и качестве камеры.

Мультиспектральные датчики или камеры. Мультиспектральные камеры являются одними из важнейших датчиков, обычно используемых в качестве дополнения к RGB-камерам в семействе датчиков БПЛА. Работа этого датчика предназначена для экспертов по растительности и сельском и лесном хозяйстве. Эта камера используется для наблюдения за уровнем воды на фермах, например, для оценки заболеваний на уровне листьев. Невероятно хорошая особенность мультиспектрального датчика заключается в том, что он собирает данные с высоким разрешением (намного лучше, чем 30 см Ground Testing Separate (GCD)), что часто не осуществимо в обычных мультиспектральных камерах. Это отличается от RGB-камер тем, что, как правило, мультиспектральные камеры поставляются с более высокой скоростью выборки из-за дополнительного оборудования, необходимого для подключения дополнительных групп к группам RGB.

Гиперспектральные датчики. Гиперспектральные датчики используются для получения изображений с сотнями предельных групп (пропускная способность 5–10 нм). Большинство гиперспектральных датчиков представляют собой прямые кластерные камеры. Гиперспектральные датчики собирают большие объемы данных, которые чрезвычайно ценны для многочисленных приложений. Чаще всего легкие гиперспектральные камеры имеют полумногомерные диапазоны (от 400 нм

до 1100 нм или от 1100 нм до 2500 нм) по сравнению с воздушными гиперспектральными камерами. Это не проблема для гиперспектральных датчиков на базе БПЛА, поскольку требует небольших усилий в плане полета и ценой ограниченного наземного обзора. Разрешение полученных изображений может достигать уровней от 2 см до 5 см или ниже.

Тепловой инфракрасный датчик. Тепловой инфракрасный датчик – это один из пассивных датчиков среднего класса с длиной волны от 3 до 35 мкм. Они в основном используются для измерения температуры поверхности и оценки тепловых потоков. Основной проблемой обеспечения температуры и излучательной способности двигателя является концентрация и её передача. Тепловые датчики часто используются для получения данных в режиме реального времени с предварительным выбором необходимой частоты захвата. Тепловые данные могут быть использованы для различных сельскохозяйственных и природных применений, а также для других применений с использованием тепловизионной камеры.

Лидары. Датчики LIDAR (обнаружение света и определение дальности) также известны как один из самых точных способов сбора геометрических данных. Эти датчики широко используются в службах рейнджеров, социальном наследии и моделировании данных зданий. Портативные, научные и наземные LIDAR в настоящее время производятся как в промышленности, так и в научном сообществе. Датчики GPS или IMU (инерциальный измерительный блок) в беспилотных летательных аппаратах часто ошибаются в определении датчика, поэтому платформа также более нестабильна во время полета. Высокоточные системы LIDAR, которые устанавливаются на БПЛА, как правило, поставляются с дифференциальными станциями GPS.

Датчики LiDAR для обнаружения криминалистических улик. Беспилотные летательные аппараты используются для сбора данных с высокой точностью обнаружения криминалистических улик с использованием подхода LiDAR. Системы LiDAR в беспилотных летательных аппаратах помогают улучшить понимание и планирование для управления городской инфраструктурой и позволяют производить геометрическое извлечение и спектральное обнаружение.

Датчики температуры и влажности. Могут использоваться для мониторинга окружающей среды, что полезно в сельском хозяйстве или метеорологии.

Здесь представлены только основные датчики для БПЛА. Разделение на два класса достаточно условное. Некоторые, как например LiDAR, могут применять как для управления, так и для сбора информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Laghari A. A., Jumanı A. K., Laghari R. A., Nawaz H. Unmanned aerial vehicles: A review // Cognitive Robotics, Vol. 3, 2023, P. 8-22.
2. Гринюк Д. А. , Жарский С. Е. , Оробей И.О., Бирюкова Н.Н. Решение задач обнаружения, сопровождения и построения их траекторий //Химическая технология и техника: тезисы 82-й науч.-техн. конф. – Минск: БГТУ, 2018. с. 112-113.

УДК 62.52

АЛГОРИТМЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БПЛА

Д.А. ГРИНЮК, Н.М. ОЛИФЕРОВИЧ,
И.О. ОРОБЕЙ, Д.Ю. ЕЖИКОВ

Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

Динамика БПЛА очень часто характеризуется большой сложностью, и по этой причине в системах управления можно встретить различные алгоритмы. Нельзя сказать, что описанные прикладные алгоритмы являются единственными для применения в том или ином случае. На выбор влияет много факторов: качество управления, сложность, устойчивость, наследственность и т.д. Каждый принцип регулирования имеет свои преимущества и недостатки. Традиционно их делят на линейные и нелинейные алгоритмы.

Пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) ПИД-регулятор является самым традиционным и изученным применяется в широком спектре задач стабилизации [1]. Классический линейный ПИД-регулятор обладает преимуществом в виде простоты настройки коэффициентов усиления параметров, простоты проектирования и высокой надежности. В тоже время имеются ряд ограничений по качеству, динамике, особенно если БПЛА характеризуются существенными нелинейными свойствами и нестационарностью. В литературе указываются недостатки применения ПИД-регулятора для квадрокоптеров, которые характеризуются относятся нелинейностью. Поэтому применение ПИД-регулятора к квадрокоптеру ограничивает его возможностями. Одна даже для таких объектов они находят свое ограниченное применение. Например, для управления положением квадрокоптера

использовался ПИД-регулятор, в то время как для управления высотой — динамический поверхностный контроль (DSC). ПИД-регулятор показал лучшие результаты при отслеживании угла тангажа, тогда как при отслеживании угла крена наблюдались большие установившиеся ошибки.

Настройка ПИД-регулятора может вызвать некоторые трудности, поскольку для обеспечения хорошей производительности ее необходимо проводить около точки равновесия, которая является точкой зависания.

Алгоритм оптимального управления LQR (линейно-квадратичный регулятор) управляет динамической системой, минимизируя подходящую функцию стоимости. Сравнение LQR и PID показало средние результаты, однако алгоритм LQR имел лучшую производительность.

В сочетании с линейно-квадратической оценкой (LQE) и фильтром Калмана алгоритм LQR преобразуется в линейно-квадратический гауссовский алгоритм (LQG). Этот алгоритм предназначен для систем с гауссовым шумом и неполной информацией о состоянии. Преимущество этого регулятора LQG заключается в том, что для его реализации не требуется полная информация о состоянии.

Управление скользящим режимом (SMC) — это нелинейный алгоритм управления, работающий путем подачи на систему прерывистого управляющего сигнала для управления скольжением по заданной траектории. Его главное преимущество заключается в том, что он не упрощает динамику за счёт линеаризации и обеспечивает хорошее слежение. Регулятор SMC обеспечивал стабильное перемещение БПЛА в заданное положение и рыскание. Отслеживание было одинаково хорошим при наличии введённого шума, что показало хорошую надёжность регулятора SMC.

Менее традиционным алгоритмом для построения технических систем является бэкстеппинговое управление. Данный рекурсивный алгоритм, который разбивает регулятор на этапы и постепенно стабилизирует каждую подсистему. Его преимущество заключается в быстрой сходимости алгоритма, что приводит к экономии вычислительных ресурсов и хорошей обработке возмущений. Основным ограничением алгоритма является его невысокая робастность. Для повышения устойчивости (к внешним возмущениям) общего алгоритма обратного шага добавляется интегратор, и алгоритм становится интегратором обратного шага. Было показано, что интегральный подход устраняет стационарные ошибки системы, сокращает время отклика и ограничивает перерегулирование параметров управления.

В связи с повышением доступности по цене и производительности микропроцессорной техники ширится применение для БПЛА адаптивного управления. В большинстве своем БПЛА характеризуются в той или иной степени нестационарностью своих динамических характеристик,

что часто вынуждает применение различных вариантов адаптации. Принципов адаптации широкое множество. В процессе построения систем требуется искать компромисс между эффективностью управления и устойчивостью.

Еще одним подходом к синтезу алгоритмов управления является использование принципов робастности. Это гарантирует устойчивость системы в пределах допустимых диапазонов возмущений или не моделируемых параметров системы. Однако следует отметить, что этот подход не способствует качественным характеристикам как, например, точности и быстродействию. Для повышения качественных характеристик робастного управления иногда применяют наблюдатели, функциональные аппроксимации или адаптивную законов в реальном времени.

Более высокое качество функционирования систем БПЛА обеспечивает применение оптимального управления. В основе алгоритмов оптимального управления обычно лежит задача комплексного управления с использованием минимизации или максимизации целевой функции путем изменения нескольких параметров. К распространенным оптимальным алгоритмам относятся LQR, L1, H_∞ и фильтр Калмана. Основным ограничением алгоритмов оптимизации, является их низкая надёжность и высокая вычислительная стоимость. Однако алгоритмы оптимального управления потенциально могут продемонстрировать превосходное качество в отношении подавления возмущений даже в условиях насыщения возмущений.

В литературе много вариантов использования нечёткой логики, машинное обучение, генетические алгоритмы и искусственных нейронных сетей как для настройки и оптимизации классических методов программирования, так и для непосредственно управления. Эти системы относительно сложны и имеют высокие требования к вычислительным ресурсам. Интеллектуальное управление не ограничивается нечёткой логикой и нейронными сетями, но эти два метода являются наиболее широко используемыми.

Весьма перспективным видится использование гибридных алгоритмов управления [1]. Как было сказано выше, системы управления БПЛА состоят из нескольких подсистем, и как правило, они обладают разной степенью нелинейности, нестационарности и шумовых составляющих на выходе датчика. Для каждой из систем можно подобрать свой алгоритм или комбинацию нескольких принципов. В литературе можно найти примеры: классического ПИД-регулятора с адаптацией настроек с помощью нечеткого алгоритма; гибридные нечеткие регуляторы с алгоритмом управления в режиме скольжения; регулятор скользящего режима использовался в качестве наблюдателя и оценщика внешних возмущений; нейронные сети использовались для компенсации не моделированной динамики.

Следует отметить развитие отдельных классов алгоритмов по подавлению возмущений, которые действуют на системы управления БПЛА и на алгоритмы фильтрации измерительных каналов. Управление подавлением возмущений направлено на активную компенсацию или ослабление влияния внешних возмущений, действующих на динамику БПЛА и на его измерительные каналы. Основным принципом управления подавлением возмущений заключается в первоначальной разработке наблюдателя для оценки вклада возмущения в неустойчивость параметров стабилизации и управления. Существует различные варианты наблюдателей: наблюдатели Калмана, наблюдатели возмущений, наблюдатели пространства состояния и наблюдатели скользящего режима.

За последние годы принципы управления полетом БПЛА были хорошо изучены. Коммерческие разработки и усилия сообщество разработчиков ПО с открытым исходным кодом обеспечивают хороший уровень управления полетами различных платформ БПЛА. Основные неопределенности вносят часто неопределенная динамика и внешние условия эксплуатации.

Развитие основных методов управления полетом привело к повышению ожиданий пользователей относительно их применения в более широком общественном и гражданском воздушном пространстве. С одной стороны, БПЛА обладают значительным потенциалом для использования в городских условиях, включая мониторинг инфраструктуры, наблюдение за дорожным движением, реагирование на чрезвычайные ситуации и доставку медицинских грузов. С другой стороны, сложность и разнообразие задач, а также неопределенность эксплуатационных условий создают дополнительные вызовы в области автономности, интеллектуальности и безопасности БПЛА, что может превышать возможности существующих методов управления полетом на основе моделей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zuo Z., Liu C., Han Q.-L., J. Song. Unmanned Aerial Vehicles: Control Methods and Future Challenges // J. of automatica sinica, vol. 9, no. 4, april 2022, P. 601–612
2. Сухорукова И. Г., Гринюк Д. А., Оробей И. О. Влияние условий фильтрации и сглаживания в информационных каналах на критерий серий // Труды БГТУ. 2016. № 6: С. 117–121.
3. Гринюк Д. А., Дубиковская Е. В., Олиферович Н. М. и др. Эффективность работы комбинированных систем регулирования. I. Обобщенный анализ // Труды БГТУ. Сер. 3, 2025. № 2 (296). С.
4. Гринюк Д. А., Олиферович Н. М., Сухорукова И. Г. и др. Уменьшение влияния помех измерительного канала на замкнутую систему регулирования // Труды БГТУ. Сер. 3. 2023. № 2 (261). С. .

К ВОПРОСУ ОБ ИЗУЧЕНИИ ПРИНЦИПОВ УПРАВЛЕНИЯ ШАГОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ СИСТЕМ

С.К. ГРУДО, А.С. ЗЫБИН

Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

Шаговые двигатели (ШД) служат для преобразования импульсного или кодового сигнала в угловое перемещение. В последнее время в связи с развитием компьютерной техники и технологии их область применения постоянно расширяется, например, в беспилотных системах, таких как дроны. Благодаря преобразованию электрических импульсов в точные механические движения ШД используют для точного позиционирования исполнительных механизмов (камер, тепловизоров и другого оборудования), для приведения в движение механизмов захвата или манипуляторов, а также для обеспечения высокой точности и плавности движений, что важно для стабилизации дрона в воздухе.

Шаговые двигатели являются синхронными электрическими машинами, у которых обмотки статора питаются от источника постоянного тока. Шаговых двигателей существует множество разновидностей. В настоящее время большинство используемых шаговых двигателей – гибридные.

Как и обычные двигатели они бывают активными (с возбужденным ротором) и реактивными. Активный ротор позволяет получить больший вращающий момент и обеспечить фиксацию положения при обесточенных обмотках статора. На статоре ШД располагаются несколько обмоток, подключаемых в определенной последовательности к источнику постоянного тока с помощью электронного коммутатора.

В зависимости от конфигурации обмоток двигателя делятся:

- унipoлярный, имеющий шесть выходов. Содержит в себе две обмотки, но каждая обмотка имеет отвод из середины;
- биполярный, имеющий четыре выхода и содержащий в себе две обмотки;

- четырехобмоточный, имеющий четыре независимые обмотки. Можно представлять его как унipoлярный, обмотки которого разъединены, а если соединить соседние отводы, то получается биполярный двигатель.

В беспилотных системах, в зависимости от их назначения, используются различные режимы работы шаговых двигателей, как и других типов двигателей.

Различают следующие режимы работы шаговых двигателей:

- статический режим, когда в обмотках статора протекает постоянный ток и магнитное поле неподвижно. Ротор находится в фиксированном положении и может только отклоняться от него на угол нагрузки θ ;

- квазистатический режим – режим, когда коммутация обмоток совершается непрерывно, но между моментами переключения электромагнитные и механические переходные процессы полностью заканчиваются и скорость ротора в начале каждого шага равна нулю. Этот режим по существу является последовательностью статических режимов;

- установившийся режим работы, это режим при постоянной частоте коммутации обмоток. Ротор двигателя в этом режиме имеет постоянную среднюю скорость вращения, но совершает периодические и непериодические угловые колебания.

Режим работы определяется конкретным применением, например, для управления системами стабилизации и механизмов подвеса.

Основными характеристиками, определяющими свойства ШД как электромеханического преобразователя, являются рабочие динамические характеристики. К ним относятся предельная механическая характеристика и зависимость частоты приёмистости от момента нагрузки.

Предельная механическая характеристика – это зависимость тактовой частоты коммутации или, что то же самое, средней скорости вращения ротора, от момента нагрузки на валу, при котором ротор ШД выпадает из синхронизма.

Под частотой приёмистости понимают максимальную частоту тактовых импульсов, при которой возможен пуск ШД из неподвижного состояния без потери шага. Различие этих двух характеристик заключается в том, что первая из них соответствует выходу из синхронизма в режиме вращения ротора, а вторая – при пуске. Поэтому отличие характеристик чисто количественное.

На сегодняшний день намного проще реализовать следящий электропривод на шаговом двигателе. Главная особенность шагового двигателя состоит в том, что положение ротора всегда можно вычислить, подсчитав количество сделанных шагов и как следствие – нет необходимости в замкнутой системе с обратной связью. Следящий электропривод считает сделанные шаги и таким образом определяет текущее положение ротора. Когда изменяется заданное значение положения вала, система вычисляет разницу между реальным и заданным углами, и делает необходимое количество шагов, чтобы скомпенсировать ошибку рассогласования. ШД могут быть частью следящего электропривода в беспилотных аппаратах, в задачах, требующих точного позиционирования и дискретных перемещений, таких как управление манипуляторами, опусканием или вращением оптических систем.

К достоинствам следящего привода на базе шагового двигателя следует отнести: простота реализации, отсутствие датчика положения ротора, отсутствие колебательных процессов. К недостаткам относится необходимость начальной синхронизации реального положения ротора и значения положения ротора в контроллере системы, а также ошибка при выходе из синхронизации шагового двигателя, которую можно скомпенсировать только повторной синхронизацией.

Исследование шаговых двигателей при проектировании беспилотных систем фокусируется на повышении их точности, надежности и энергоэффективности для конкретных задач управления, а также на интеграции с системами управления БПЛА для точной координации движений. Для изучения принципа работы шагового двигателя и его работы в составе следящих систем часто используется специализируемое учебное оборудование. В некоторых учебных лабораторных стендах (например, компании ЧПУП «НТП «Центр»», г. Могилев) по изучению микропроцессорной техники и элементов систем управления содержится блок, позволяющий исследовать принципы управления ШД с помощью драйвера, а также организацию следящей системы с помощью электронного программного обеспечения.

Собрав определенную схему подключения драйвера управления к ШД (рис. 1), можно выполнить контроль входных и выходных сигналов драйвера с помощью встроенного цифрового осциллографа.

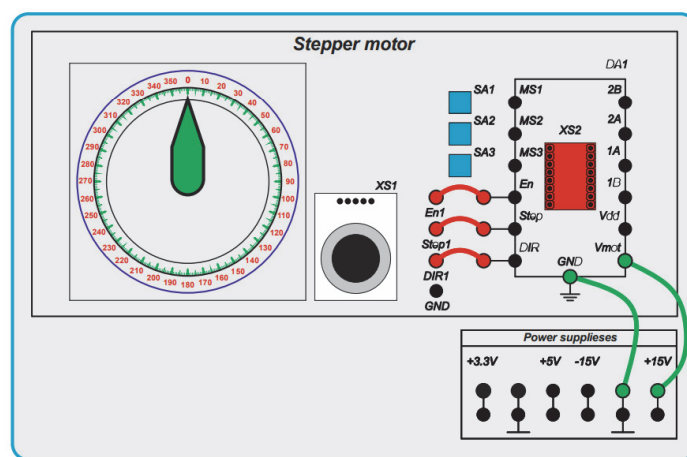


Рис. 1. Схема исследования режимов работы ШД

Общий алгоритм управления следящей системой реализуется в программе верхнего уровня на компьютере. Положение вала двигателя отображается на мониторе компьютера, а реальную отработку программы можно оценить визуально по градусной шкале 0.360° , установленной на электромашинном агрегате, и стрелке на валу двигателя (рис. 2).



Рис. 2. Пример рабочего окна панели управления

Подобного рода блоки, интегрированные в лабораторные стенды, позволяют реализовывать несколько режимов работы следящей системы с ШД: режим постоянного вращения, режим одиночных шагов, режим синхронизации, режим реверсирования, режим ручного управления. Исследование режимов позволяет получить ряд зависимостей и определить влияние выбранного деления шага ШД на скорость и точность следящей системы, что в дальнейшем может быть использовано при проектировании более сложных конструкций.

УДК 621.355

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФАКТИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ СБОРОК ЛИТИЙ-ИОННЫХ ЯЧЕЕК МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

К.В. ДОБРЕГО¹, В.Л. ЧЕРВИНСКИЙ², А.С. КАЛЕДНИК²

¹ ООО «Белинвестторг» холдинг 1AK GROUP

² Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

В связи с развитием электротранспорта, ростом «зеленой» энергетики, необходимостью регулирования нагрузки энергосистем рост рынка аккумуляторных батарей (АКБ) в последнее десятилетие составлял 20–30 % в год [1].

Батарейные подсистемы построены как последовательно-параллельные сборки электрохимических ячеек. Ячейки не являются абсолютно

одинаковыми устройствами, емкость сборки зависит от разброса параметров составляющих ее ячеек, структуры сборки, режима зарядки – разрядки, особенностей работы системы управления батареей (BMS) и других факторов. Важным вопросом является - *какова фактическая емкость батареи и как она может изменяться в процессе эксплуатации*. Основным способом решения задачи является прямое моделирование работы сборки ячеек на уровне электрохимических моделей, эмпирических моделей [2,3] с заданием обоснованного разброса параметров. Применение существующих моделей в контексте рассматриваемой задачи затруднительно ввиду их сложности и отсутствия информации о разбросе электрических, химических, структурных и прочих параметров ячеек.

В работе [4] предложена методика моделирования работы сборок литий-ионных ячеек как системы ячеек со статистически распределенными параметрами. Рассматривалась регулярная зарядка-разрядка постоянным током последовательной сборки (16s) литий ионных LiFePO4 ячеек. Настоящая работа посвящена применению указанного подхода для моделирования более сложной системы, - параллельной пары литий ионных батарей.

Аппроксимируем экспериментальную зависимость $V_{oc}(SOC)$ [2] статистической функцией (1).

$$V_{oc} = E_0 + A \cdot SOC + B \cdot \exp((SOC - 1)/D) - F \cdot \exp(-G \cdot SOC), \quad (1)$$

где E_0, A, B, D, F, G - параметры модели. Используем (1) для моделирования электрических параметров ячеек.

Напряжение на ячейке представляется в виде суммы напряжения разорванной цепи, падения напряжения на активном сопротивлении и поляризационного напряжения.

$$U = V_{oc} - I(R_a + R_p) \quad (2)$$

Параметры модели (1), (2) не зависят от направления тока (разрядка или зарядка). Незначительный гистерезис функции $V_{oc}(SOC)$ при смене направления тока не учитывается. Значение SOC рассчитывается по величине протекшего заряда и емкости.

$$SOC = 1 - \int_0^t Idt / C \quad (3)$$

В основе метода лежит гипотеза о том, что при равном статистическом разбросе всех параметров модели (1)-(3) генерируемое множество кривых зарядки/ разрядки адекватно реальному множеству. Значения всех параметров распределены по нормальному закону с одинаковым относительным стандартным отклонением.

Статистическая модель ячейки. Согласно статистики компании 1AK-GROUP средняя емкость партии литий-ионных ячеек превышает

номинальную $C \approx C_H(1+2\cdot\sigma_0)$, где C_H – номинальная емкость, σ_0 – относительное стандартное отклонение емкости ячеек в партии. Так при $C_H = 105$ А·ч и $\sigma_0 = 1\%$ $C = 107,1$ А·ч. Емкость ячейки C_i определяется в цикле зарядки – разрядки в диапазоне $U = 2,5 - 3,65$ В при этом определяются параметры C и σ , Табл.1.

Табл.1. Параметры статистической модели ячейки ((1) -(3))

$C_{ном}$ А·ч	$U_{ор,}$ В	$E_0,$ В	A, В	B, В	D, б.р.	F, В	G, б.р.	$R_a,$ мΩ	$R_p,$ мΩ	C, А·ч	σ
105	3,1 - 3,4	3,2 2	0,122 3	0,255	0,011 7	0,39 722	30,9 828	0,93	0,6	107. 1	0.9%

Ниже представлены расчеты эволюции емкости батареи s16 при циклировании при разных начальных значениях разброса SOC ее ячеек (σ_{SOC}) и для разных режимов балансировки. Среднее значение и разброс определялись на основании расчёта группы 30 батарей со случайным набором ячеек. Базовый вариант параметров: $\sigma_{SOC} = 5\%$; ток балансировки $I_b = 1$ А; порог напряжения для начала балансировки $\Delta U_b = 0.2$ В; время балансировки $\Delta \tau_b = 10$ сек.

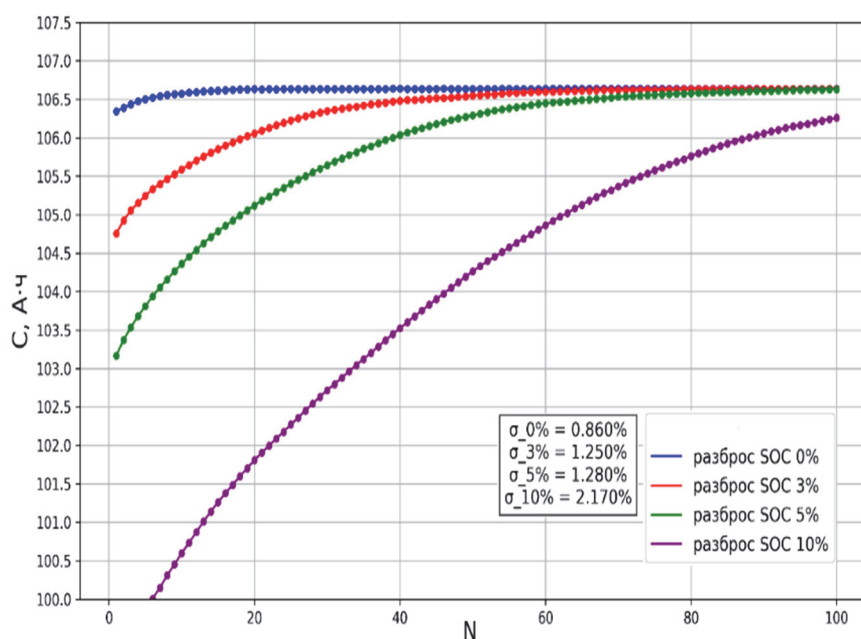


Рис.1. Статистический тренд выхода емкости модуля на максимальное значение от количества циклов N. Базовые параметры балансировки. 1, 2, 3, 4 – $\sigma_{SOC} = 0\%, 3\%, 5\%$ и 10% соответственно

Скорость выхода емкости на максимальное значение зависит как от тока балансировки, так и от периода балансировки $\Delta \tau_b$, рис.1.

В [4] показан эффект срыва балансировки при снижении порога напряжения начала балансировки ΔU_6 ниже определенного значения, рис.2.

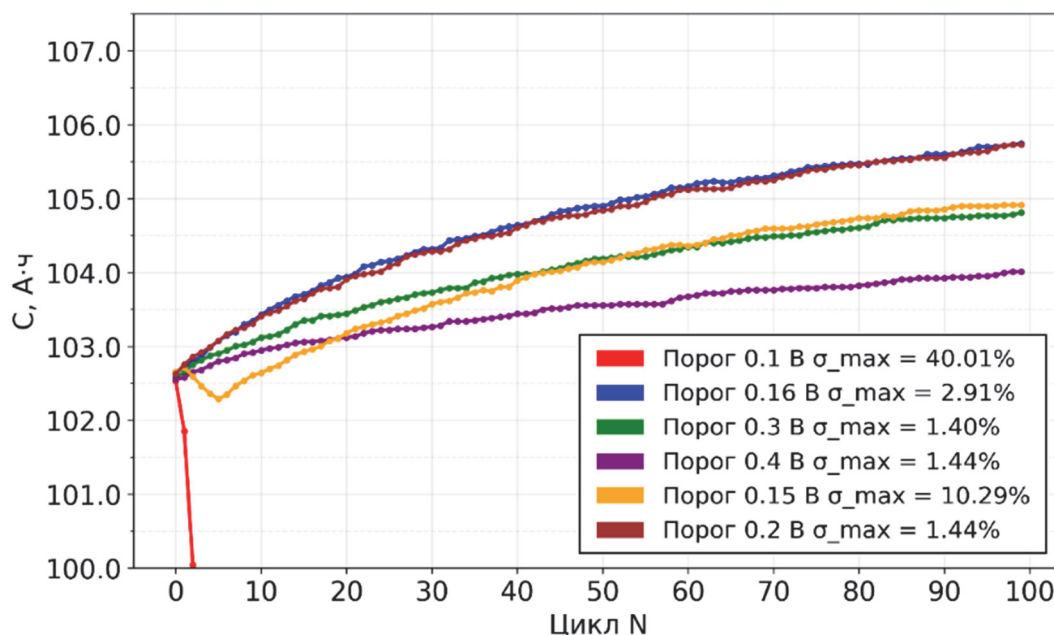


Рис.2. Статистический тренд выхода емкости модуля на максимальное значение от количества циклов N, $\sigma_{SOC}=5\%$. 1, 2, 3, 4, 5 – порог начала балансировки $\Delta U_6=0.1, 0.15, 0.16, 0.2, 0.3$ и 0.4 В соответственно

Согласно рис. 2, при $\Delta U_6=0.1$, балансировка не выравнивает SOC ячеек. Граница, разделяющая режим эффективной балансировки от режима ее срыва - $\Delta U_{66} \sim 0.15$ В.

Обратимся к исследованию работы параллельных батарейных модулей. Каждый из модулей управляется независимой BMS. Зарядка и разрядка пары производится стабилизированным током (при режиме 0,5C ток 105 А). Ток разделяется в соответствии с ЭДС (ε) и внутренним сопротивлением батарей r_1 и r_2 :

$$I_1 = \frac{I \cdot r_2}{r_1 + r_2} - \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{r_1 + r_2}, \quad I_2 = I - I_1, \quad (5)$$

где $I > 0$, $U > \varepsilon_1, \varepsilon_2$ при зарядке и $I < 0$, $\varepsilon_1, \varepsilon_2 > U$ при разрядке.

На рис. 3 представлен результат статистического расчета для группы 30 пар модулей токов первого цикла зарядки – разрядки. Начальный статистический разброс степени заряженности ячеек в модуле $\sigma_{SOC}=5\%$. При моделировании реализован базовый режим балансировки с порогом начала балансировки $\Delta U_6=0.2$ В.

Как видно, при высокотокковых режимах зарядки велика вероятность превышения порога допустимого тока для одного из модулей и, как следствие, выключение и недозарядка модуля.

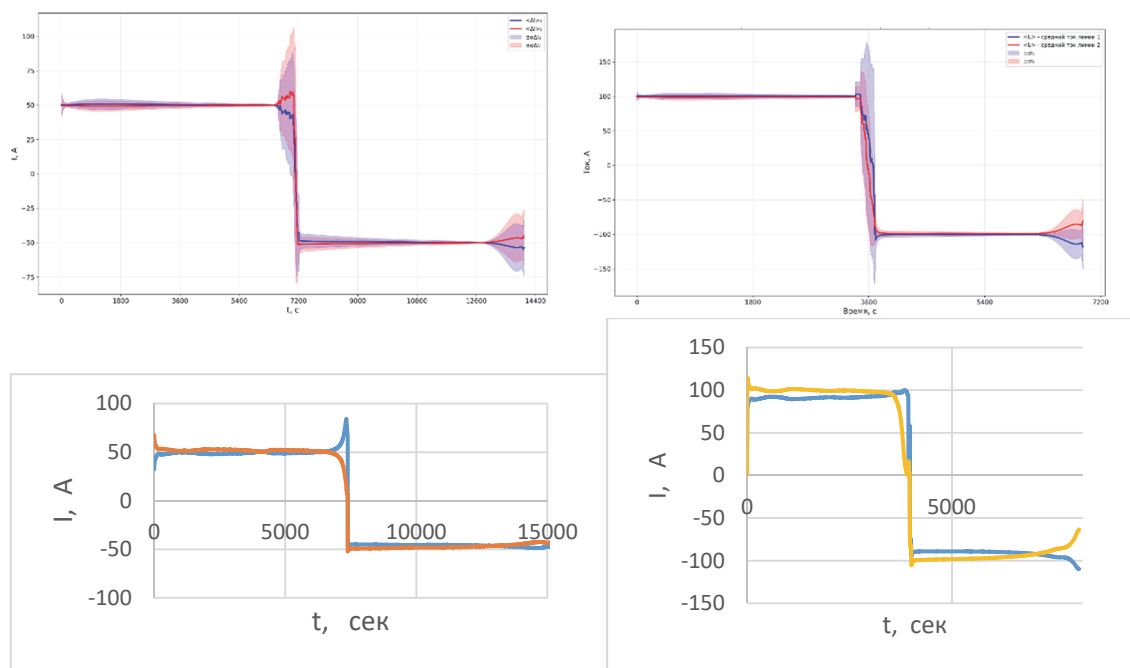


Рис.3. Амплитуда дисбаланса токов зарядки- разрядки первого цикла и ее относительное среднеквадратичное отклонение для 30 случайных пар модулей (верхние рисунки) экспериментальные данные (нижние рисунки). Ток 0.5C (слева) и 0.95C (справа). $\sigma_{SOC}=5\%$.

Интересный результат - наличие области схождения токов к номинальному значению на уровне SOC $\approx$ 90% при зарядке и уровне SOC $\approx$ 25% - при разрядке, что подтверждено экспериментами.

В табл. 2 и 3 приведены результаты статистических расчетов дисбаланса токов зарядки и разрядки и общей емкости от параметров системы. Дисбаланс рассматривался только при работающих модулях.

Табл. 2. Максимальный дисбаланс токов при зарядке и разрядке, соответствующие величины относительного среднеквадратичного отклонения, а также емкость цикла C_{fact} .

σ_{SOC} , %	$\langle I \rangle$, A	$ I_1 - I_2 _{max,chr}$	$\sigma_{\Delta I chr}$	$ I_1 - I_2 _{max,dchr}$	$\sigma_{\Delta I dchr}$	C_{fact} , A.ч
0	50	35.932	4.375	59.879	10.161	101.536
1	50	34.964	4.251	51.533	9.961	101.279
3	50	32.068	3.906	46.405	9.900	100.225
5	50	28.719	3.649	46.550	10.000	98.864

Фактическая емкость пары снижается с ростом начального расхождения σ_{SOC} , при этом дисбаланс токов также снижается с увеличением начального разброса SOC, что объясняется тем, что недозаряд и общее снижение емкости пары, обусловленное ростом σ_{SOC} , сильнее влияет на снижение дисбаланса токов чем рост σ_{SOC} на его увеличение.

Табл. 3. Максимальный дисбаланс токов при зарядке и разрядке, соответствующие величины относительного среднеквадратичного отклонения, а также емкость цикла C_{fact} при различных токовых режимах iC . $\sigma_{\text{SOC}}=3\%$.

iC	$\langle I \rangle, A$	$ I_1 - I_2 _{\text{max,chr}}$	$\sigma_{\Delta I_{\text{chr}}}$	$ I_1 - I_2 _{\text{max,dchr}}$	$\sigma_{\Delta I_{\text{dchr}}}$	$C_{\text{fact}}, A \cdot ч$
0.25	25	25.72	3.45	2.13	5.14	100.63
0.5	50	35.85	4.41	4.24	0.36	100.74
0.9	90	59.53	6.98	5.53	5.12	99.47

Исследуем характер изменения дисбаланса токов и общей емкости пары модулей при многократном циклировании, рис.4, 5.

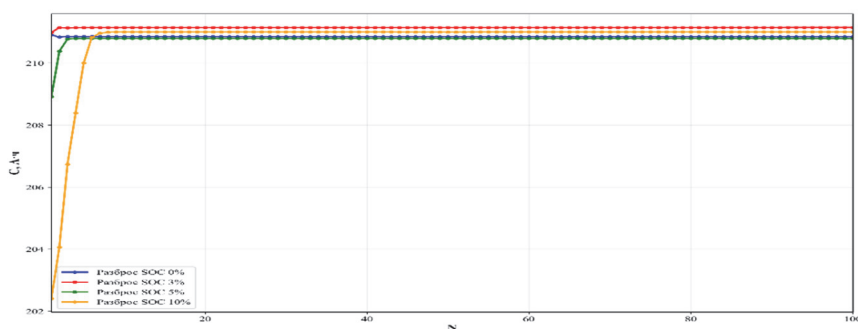


Рис. 4. Изменение доступной емкости параллельной пары от количества зарядно-разрядных циклов N . Ток $0.5C$; $\Delta U_6 = 0.15$ В. 1, 2, 3, 4 - $\sigma_{\text{SOC}} = 0, 3, 5$ и 10%

Характерным поведением вновь собранной параллельной пары модулей является разбежка показываемой токовой емкости модулей на первых 5 – 10 циклах с последующей стабилизацией емкости каждого модуля и пары в целом.

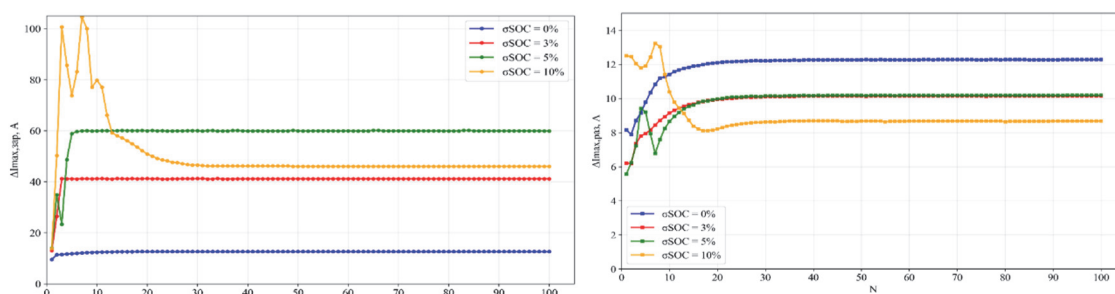


Рис. 5. Зависимость $\Delta I_{\text{max,chr}}$ и $\Delta I_{\text{max,dchr}}$ от количества циклов N . Ток $0.5C$. $\Delta U_6 = 0.15$ В. 1, 2, 3, 4 - $\sigma_{\text{SOC}} = 0, 3, 5$ и 10%

ЛИТЕРАТУРА

1. Лемешевский В.М. Развитие аккумуляторной отрасли и стратегическое позиционирование холдинга 1ak-group. *Механика машин, механизмов и материалов*. 2025. № 3(72), С.92- 96

2. Доброго К.В., Козначеев И.А., Червинский В.Л. Моделирование пассивного сопряжения блоков гибридной системы накопления электроэнергии. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2024; т.676 №3, С. 209-227

3. Doyle, M.; Newman, J. The use of mathematical modeling in the design of lithium/polymer battery systems. *Electrochim. Acta* 1995, 40, 2191–2196.

4. Доброго К.В., Лемешевский В.М., Червинский В.Л., Каледник А.С. Оценка рабочей емкости сборок литий-ионных аккумуляторов методом Монте-Карло. Сб. докладов Межд. науч. конф. «Современные электрохимические технологии и оборудование» МЕТЕ 2025 19-23 мая 2025, сс.61-64.

УДК 681.532.8:621.391

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГИРОСТАБИЛИЗИРОВАННОГО ОПОРНО-ПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА

Д.С. КАРПОВИЧ, И.О. ОРОБЕЙ, В. В. САРОКА, ЧЖЭН ЮЙТЯНЬ
Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

При проектировании системы управления гиростабилизированного опорно-поворотного устройства (ГОПУ) необходимо уделить внимание таким вопросам как обеспечение высокой динамической точности наведения при движении объекта-носителя, обеспечение требований по количеству осей, диапазону и шагу углов наведения, требований по прочности элементов, устойчивости при воздействии механических вибраций и ударов, учет возможной инерции при позиционировании, подстройка под возможное изменение положения платформы, наряду с выполнением требований по массе и условиям размещения на объекте.

Высокая динамическая точность приводов наведения может быть обеспечена за счет выбора соответствующего закона управления, использования быстродействующих исполнительных устройств и механических передач с высокой жесткостью и малой зоной нечувствительности. Требования по минимизации массы и условиям размещения ГОПУ на объекте может быть устранено при использовании безредукторных приводов.

Погрешность измерения углов поворота ГОПУ определяется точностью физического метода измерения, собственной погрешностью

датчиков угла, а также погрешностью, вносимой механической передачей, соединяющей исполнительные механизмы системы управления с конструктивными элементами ГОПУ, формирующими ось наведения. Третья из этих погрешностей имеет наибольшее влияние в том случае, если конструктивно не представляется возможной установка датчика угла непосредственно в оси наведения.

Датчики угла ГОПУ установлены в редукторах приводов наведения и измеряют текущие углы поворота ГОПУ через приборные ветви этих редукторов. Погрешности передачи угла этими приборными ветвями редукторов являются составной частью погрешности измерения углов поворота ГОПУ. Возможность уменьшения влияния этой погрешности заключается в ее алгоритмической компенсации путем введения поправок в измеренный датчиком угол поворота.

УДК 678.8

МОДЕЛИРОВАНИЕ И 3D ПЕЧАТЬ БЫСТРОСЪЕМНОГО ЛЮЧКА ДЛЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ БПЛА

О.М. КАСПЕРОВИЧ¹, В.О. ГОВОРОВСКИЙ², А.О. ТИШЕВИЧ²

¹Белорусский государственный технологический университет,

²ЗАО «Беспилотные летательные аппараты»

Минск, Беларусь

Обслуживание БПЛА – это регулярная проверка электроники, замена аккумуляторов, диагностика сенсоров и т.д. Доступ к таким узлам должен быть быстрым (без инструментов и лишних движений), надежным (с сохранением герметичности и прочности конструкции) и интуитивным (понятным даже в полевых условиях).

Быстросъемный лючок – это удобство, своеобразный элемент инженерной культуры, особенно в сфера БПЛА, где каждая секунда обслуживания и грамм веса имеют значение.

Конструктивная идея такого лючка может быть разной, однако следует помнить о ключевых моментах:

- тип фиксации: магнитная с механической защелкой, байонетная система, система зацепов, поворотная с замком и т.д.;

- материал: крышка из ПКМ (стеклотекстолит, углепластик) или пластика, устойчивого к атмосферным воздействиям, рамка из АБС-пластика или алюминия с посадочным уплотнителем, уплотнение из силикона;

- форма: эргономичный контур (овальный или многоугольный), интегрированный в обводы контура;

- маркировка: цветовая или графическая индикация для быстрого поиска;
- виброустойчивость: фиксация быстросъемного лючка должна исключать самопроизвольное открытие;
- герметичность: защита от пыли, влаги и перепадов давления;
- технологичность: возможность изготовления на 3D-принтере или фрезеровке, минимум постобработки, встроенные направляющие и ограничители входа.

Таким образом, быстросъемный лючок – это правильность выбора фиксации, материалов и геометрии, позволяющие объединить технологичность изготовления с практичностью, а достижение виброустойчивости – сохранить целостность и функциональность в самых жестких условиях. Разработка таких решений – это шаг к более адаптивным, ремонтпригодным и профессиональным реалиям.

УДК 681.5.08

ЛИНЕЙКА ОПТИЧЕСКИХ ЦЕЛЕВЫХ НАГРУЗОК РАЗРАБОТАННЫХ И СЕРИЙНО ВЫПУСКАЕМЫХ В РУП «НПЦ МБК» НАН БЕЛАРУСИ

А.Н. ЛЕВАДНЫЙ, Ю.Ф. ЯЦЫНА, М.В. МАКСИМОВА

Республиканское унитарное предприятие «Научно-производственный
центр multifunctionальных беспилотных комплексов»
НАН Беларуси, Минск, Беларусь

В качестве целевой нагрузки БЛА «Буревестник», «Бусел-М», дронов – мишеней на предприятии «НПЦ МБК» разработана и производятся линейка из ОЭС различного типа и веса. Целевая нагрузка БЛА предназначена для выполнения задач по мониторингу земной поверхности, неподвижных и подвижных объектов, как показано на рис.1

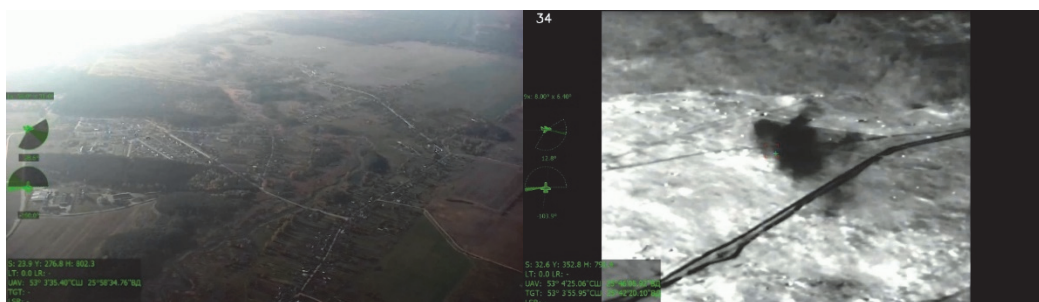


Рис. 1. Пример видовой информации мониторинга земной поверхности

Наиболее универсальными и большими по массе - до 12кг, являются многофункциональные гиростабилизированные ОЭС на дальности наблюдения 5км и 15км, которые показаны на рис. 2, в состав которых входит видеокамера видимого диапазона, ИК-модули, лазерный дальномер, лазерная указка.



Рис. 2. Многофункциональные гиростабилизированные ОЭС.

Назначение многофункциональных ОЭС:

- получение телевизионного и тепловизионного изображения местности при выполнении – функций наблюдения, поиска, обнаружения, распознавания и автоматического сопровождения наземных объектов;
- измерения дальности до выбранного объекта;
- определение характеристик объекта (координаты, размер, направление движения);
- сжатие видеопотока, запись видеоинформации (встроенная флэш-память 128 GB);
- подсветка выбранных объектов лазерного осветителя в ближнем ИК-диапазоне.

Особенностями таких ОЭС являются наличие производительного бортового микрокомпьютера с операционной системой Linux, который производит обработку видеоинформации, реализует функции автоматического трекинга объекта.

Основные технические характеристики приведены в таблице.

Таблица

1. Телевизионный модуль		
Сенсор		CMOS
Количество активных пикселей	пиксел	2,3 Мпикс
Спектральный диапазон	мкм	Видимый (VIS) 0.4 — 0.75 мкм Ближний ИК (NIR) 0.75 — 1.1 мкм
Оптическое увеличение	крат	70 крат
Поле зрения по горизонтали	градус	1.4° - 54.0°
Формат (стандарт) видеоизображения		Цифровое видео 720p/1080p
2. ИК модули		
Тип сенсора		Неохлаждаемый микроболометр
Количество пикселей		640*512 пикселей
Спектральный диапазон	мкм	8 – 4 мкм
Фокусное расстояние	мм	Вариобъектив 20-100мм или фиксированные объективы
3. Модуль лазерного дальномера		
Дальность измерения	м	100-15000 м
Точность измерения	м	±2 м
Длина волны излучения	нм	1535 нм
4. Лазерный подсветчик (опция)		Дальность до 1000 м, длина волны 850нм
5. Гиростабилизированный электропривод		Двухосевой, с бесколлекторными электромоторами
6. Модуль обработки видеоизображения и управления		Микрокомпьютер с ОС Linux
Преобразование в стандарт Ethernet, сжатие видеопотока		Стандарт H.264, настройка сжатия и скорости видеопотока
Автоматическое сопровождение объекта по угловым координатам		Адаптивное окно слежения Минимальное - 16×16 пикселей, максимальное - 128×128 пикселей
7. Общие характеристики		
Вес	кг	12
Диапазон рабочих температур	°C	-20 °C +40 °C;
Потребляемая мощность	Вт	40-120

В классе легких ОЭС массой до 1,5кг выпускаются гиростабилизированные по двум осям системы с различным сочетанием каналов наблюдения (ИК-ЛД, ТВ-ЛД, ИК-ТВ, ТВ), внешний вид которых показан на рис. 3. Для таких систем разработана система цифровой стабилизации по третьей оси - по крену БЛА.



Рис. 3. Гиростабилизированные оптико-электронные системы для проведения работ, связанных с исследованием леса и растительного покрова, разработана и применяется мультиспектральная ОЭС.

Дальнейшие работы по совершенствованию ОЭС направлены на улучшение качества изображения, увеличения дальности обнаружения объектов, внедрение искусственного интеллекта для решения задач наблюдения.

УДК 536.25

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ НА ОРЕБРЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ БПЛА

Г.С. МАРШАЛОВА, А.Б. СУХОЦКИЙ

Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

Современное развитие БПЛА характеризуется значительным увеличением времени полета, мощности бортовой вычислительной техники, датчиков и систем связи. Это приводит к резкому росту тепловыделения от ключевых компонентов: силовых установок, электроники, аккумуляторных батарей.

Ключевой задачей является поиск оптимума между растущими тепловыми нагрузками и жесткими ограничениями по габаритам, массе и энергопотреблению.

Серийные малые БПЛА для охлаждения используют элементы самого БПЛА (обшивку, крылья, перегородки). Такие БПЛА чаще всего выполняются из алюминиевых сплавов или композитов. Основными требованиями к материалам являются высокая теплопроводность,

прочность, легкость при низкой стоимости. Тепловая энергия в таких БПЛА может передаваться через тепловые трубы или контактные плиты на обшивку фюзеляжа, которые при набегании воздушного потока будут рассеивать тепло в окружающую среду.

В более мощных коптерах, где электроника может сгенерировать значительное количество теплоты, используют принудительное воздушное охлаждение с помощью вентиляторов.

В БПЛА, где тепловые нагрузки слишком велики для естественного охлаждения с корпуса, активно используются развитые поверхности, в том числе оребренные. При этом оребрение используется для охлаждения как в режимах свободной, так и вынужденной конвекции.

Таким образом, экспериментальные исследования развития поверхности с помощью оребрения являются инструментом качественного проектирования систем охлаждения.

Цель работы – экспериментальное исследование теплоотдачи в режиме свободной конвекции воздуха гладкой и оребренной трубы.

Исследования теплоотдачи проводились для оребренной трубы следующих параметров, мм: диаметр $d = 56,8$; диаметр трубы по основанию $d_0 = 26,4$; высота, шаг, средняя толщина ребра соответственно $h = 15,2$; $s = 2,43$; $\Delta = 0,52$; теплоотдающая длина оребрения трубы $l = 300$; общая длина оребренной трубы $l = 330$. Коэффициент оребрения трубы составил $\phi = 21$. Диаметр гладкой трубы составил $d_0 = 26,4$ мм.

Экспериментальные исследования проводились методом полного моделирования. Применялся труб вставными теплоэлектронагревателями. Схема экспериментальной установки, конструкция трубы-калориметра и ее оснащение температурными датчиками, аппаратное оформление установки измерительными приборами, методика исследования и порядок проведения опытов изложены в [1]. Во время проведения опытов температура поверхности трубы изменялась в интервале $t_{\text{ст}} = 26\text{--}256^\circ\text{C}$, температура окружающего воздуха в камере $t_0 = 20\text{--}27^\circ\text{C}$, подводимая к трубе электрическая мощность $W = 5\text{--}230$ Вт.

Результаты экспериментальных исследований обрабатывались и представлялись в виде зависимости числа Нуссельта от чисел Грасгофа:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha_{\text{к}} \cdot d_0}{\lambda}, \quad (1)$$

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot \beta \cdot d_0^3 \cdot (t_{\text{ст}} - t_0)}{\nu^2}, \quad (2)$$

где $\alpha_{\text{к}}$ – средний приведенный конвективный коэффициент теплоотдачи, отнесенный к полной наружной поверхности, Вт/(м² К); λ , ν – коэффициенты теплопроводности, Вт/(м·К), и кинематической вязкости

$\text{м}^2/\text{с}$; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; β – коэффициент температурного расширения, К^{-1} .

Определяющей температурой для расчета теплофизических свойств воздуха является температура окружающего воздуха t_0 , $^{\circ}\text{C}$.

На рисунке изображены результаты исследования в виде зависимости $\text{Nu} \cdot \phi = f(\text{Ra})$ для учета вклада развития поверхности.

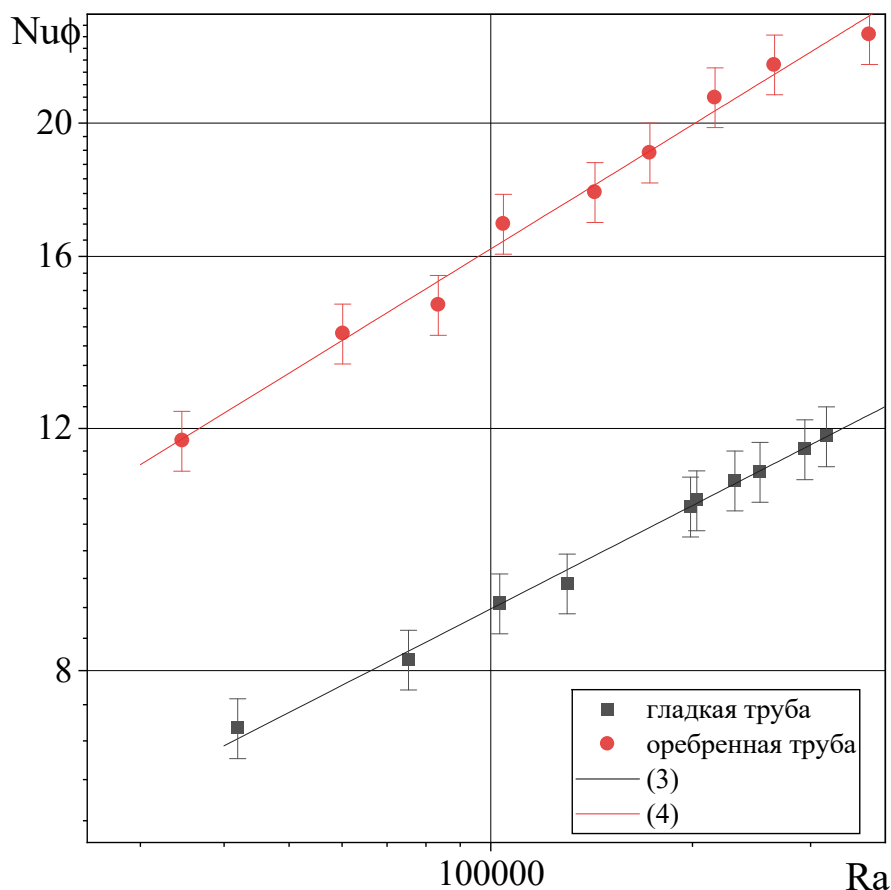


Рис. Теплоотдача гладкой и оребренной трубы в режиме свободной конвекции

Полученные экспериментальные данные, с погрешностью не превышающей 5%, обобщены критериальными уравнениями следующего вида

для гладкой трубы

$$\text{Nu} \cdot \phi = 0,498 \cdot \text{Ra}^{0,25}, \quad (3)$$

для оребренной трубы

$$\text{Nu} \cdot \phi = 0,511 \cdot \text{Ra}^{0,3}. \quad (4)$$

Уравнение (3) соответствует данными Михеева [2] для гладкого одиночного горизонтального цилиндра в условиях свободной конвекции в неограниченном объеме.

Как показано на рис. развитие поверхности с помощью оребрения позволяет увеличить эффективность теплоотвода в 1,5–1,9 раза. Это доказывает высокую эффективность развития поверхности как метода интенсификации теплообмена.

При этом стоит отметить, что с ростом числа Рэлея эффективность в указанных диапазонах повышается, так как наблюдается увеличение темпа роста теплоотдачи. Это означает, что выигрыш в теплоотдаче более значителен в условиях более интенсивного конвективного течения (при больших температурных напорах).

Таким образом, развитие поверхности теплообмена с помощью оребрения является перспективным и эффективным инструментом для отвода больших тепловых потоков в условиях жестких ограничений по массе, габаритам и энергопотреблению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Разработка стенда и исследование свободной конвекции одиночной трубы при различных углах наклона / А. Б. Сухоцкий, В. Н. Фарафонов, В. В. Дударев, С. О. Филатов, Г. С. Сидорик // Труды БГТУ. Сер. 1. Лесн. хоз-во, природопольз. и перераб. возоб. рес. – 2017. – № 1. – С. 169–174.

2. Михеев, М. А. Краткий курс теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 208 с.

УДК 621.313.4

РАЗРАБОТКА, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЯ ВЕНТИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ БПЛА С МОНОЛИТНОЙ НЕОДНОРОДНО НАМАГНИЧЕННОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ ИЗ МАГНИТОПЛАСТА НА ОСНОВЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДА Nd-Fe-B

Ю.В. МИЛОВ, В.Н. МИЛОВ, Е.В. МИЛОВ
ООО «Магнитоэлектромеханика», Москва, Россия

В подавляющем большинстве случаев в БПЛА используются вентильные электрические двигатели (ВЭД), содержащие магнитную систему, составленную из четного количества коллинеарно намагниченных

постоянных магнитов на базе интерметаллида Nd-Fe-B с добавлением тяжелых редкоземельных элементов, повышающих рабочую температуру до 180-200 °С. До настоящего времени применение редкоземельных изотропных магнитопластов в ВЭД с высокой удельной мощностью считалось невозможным, так как остаточная намагниченность изотропных магнитопластов почти в два раза меньше, чем у коллинеарных спеченных магнитов из Nd-Fe-B [1]. Редкоземельные магнитопласты сегодня применяются в маломощных двигателях с высокой равномерностью вращения, где отсутствие в них вихревых электрических токов (магнитопласты обладают низкой проводимостью), позволяет добиваться низких потерь и, следовательно, повышенного КПД.

В настоящей работе нами показано, что специальные формы намагничивания монолитных многополюсных магнитных систем из редкоземельных магнитопластов позволяют компенсировать низкое значение величины остаточной намагниченности и создавать на их базе ВЭД с высокими значениями КПД и удельной мощности с возможностью применения в БПЛА различных типов.

На рис. 1 представлено фото статора и ротора одного из изготовленных ВЭД, близкого по размерам к широко используемому в легких БПЛА двигателя модели 2812 фирмы BrotherHobby.



Рису. 1. Фото статора и ротора изготовленного ВЭД.

На рис. 2 представлено фото магнитной системы производства ООО «Валтар» для ротора ВЭД (рисунок 1) вместе с визуализатором магнитного поля. Магнитная система представляет собой кольцо с внутренним диаметром 28.4 мм и внешним диаметром 34.2 мм. Высота магнитной системы составляет 12 мм. Плотность материала магнитной системы составляет 6.1 г/см³, в результате чего ее вес существенно меньше веса спеченных магнитов Nd-Fe-B, применяемых в оригинальном

ВЭД 2812. Магнитная система содержит семь пар магнитных полюсов. Угловое распределение намагниченности близко к синусоидальному, за счет чего магнитное поле на внешней стороне магнитной системы не превышает десяти процентов от величины поля внутри магнитной системы. С использованием описанной магнитной системы было изготовлено и испытано несколько образцов ВЭД, отличавшихся типами намоток статора и конструкцией магнитного замыкателя.



Рис. 2. Фото магнитной системы из магнитопласта.

На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости тяги от потребляемой электрической мощности для одного из изготовленных ВЭД и оригинального двигателя модели 2812 фирмы BrotherHobby. Измерения проводились на стенде с использованием серийного винта Gemfan 9045. Из рисунка видно, что изготовленный ВЭД с магнитной системой из магнитопласта обладает более высокой эффективностью чем оригинальный 2812 на всем диапазоне измерений.

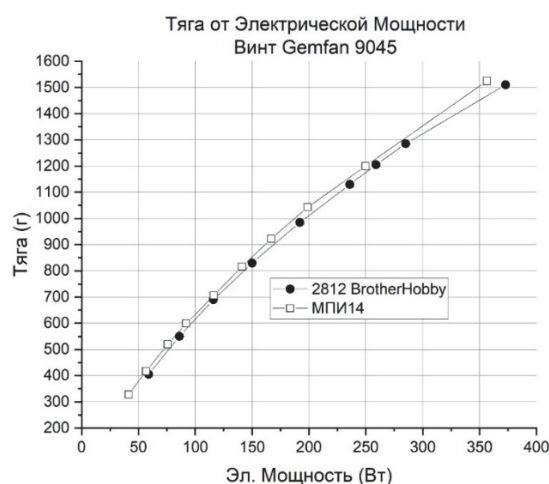


Рис. 3. Зависимости тяги от потребляемой электрической мощности.

По результатам работы можно сделать вывод о перспективности замены магнитных систем из китайских спеченных редкоземельных магнитов на российские магнитные системы из редкоземельных магнитопластов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rapidly Solidified Neodymium-Iron-boron Permanent Magnets / John J. Croat, Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, 2018.

УДК 634.377

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ БПЛА

**М.Н. ПИЩОВ, С.Е. БЕЛЬСКИЙ, А.В. БЛОХИН,
А.И. СУРУС, А.М. ЛОСЬ**

**Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь**

Развитие беспилотных технологий – одно из самых перспективных направлений. Республика Беларусь наряду с другими государствами участвует в разработках по реализации данных технологий. В будущем это приведет к увеличению безопасности, экономическому росту и развитию социальной сферы страны в целом.

Применение БПЛА в современном мире имеет высокую актуальность. В частности, БПЛА нашли широкое применение в задачах радионавигации, радиолокации, радиоэлектронных системах связи и др. Одними из важнейших этапов при построении беспилотной системы являются ее проектирование и проведение испытаний [1].

В процессе проектирования определяются важнейшие критерии, параметры и порядок выполнения работ для разрабатываемой беспилотной системы. Без проведения этапа процесса проектирования самого проекта беспилотника его построение является не столько невозможным, сколько бесполезным. А этап процесса проведения испытаний позволяет выявлять ошибки алгоритмов работы беспилотной системы еще до ее запуска в серийное производство. В случае с объектами повышенной опасности, а именно транспортными средствами, данные этапы являются обязательными [1].

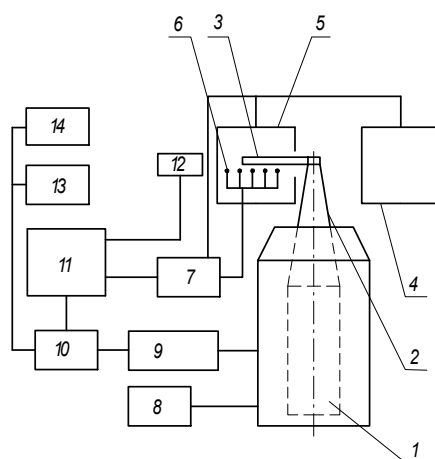
При эксплуатации в реальных условиях любого типа БПЛА основными требованиями являются надежность самой конструкции, а также ее основных узлов. Минимально необходимый состав БПЛА включает в себя набор таких элементов, как раму, двигатели, регуляторы оборотов, полетный контроллер, аккумуляторную батарею и аппаратуру управления. Известно, что сама конструкция рамы БПЛА при эксплуатации испытывает переменные (циклические) нагрузки, связанные с режимами работы беспилотника, в связи с чем актуальной задачей является определение усталостных характеристик материалов, для обеспечения необходимого срока службы.

Проведение усталостных испытаний ограничивается отсутствием установок, позволяющих проводить нагружение моделей различными типами колебаний в широком диапазоне частот.

Для проведения исследований использованы испытательные стенды, разработанные ранее в БГТУ и подвергнутые частичной модернизации [2-4]. Наиболее распространенными высокочастотными стендами, работающими в диапазоне частот 3-50 кГц, являются испытательные установки с магнитострикционными преобразователями. Они используются для возбуждения как продольных колебаний растяжения-сжатия, так и симметричных и асимметричных циклов знакопеременного изгиба и кручения. Магнитострикционные машины с более низкой частотой не создаются из-за больших габаритов. Для таких частот нагружения существуют установки с другим принципом действия, например, электродинамические. Применение же более высоких частот нецелесообразно из-за значительного саморазогрева образцов, существенно искажающего результаты испытаний [5, 6].

Для проведения испытаний на высоких (3; 9; 18 и 44 кГц) частотах использовались магнитострикционные стенды, работающие в автоколебательном режиме, принципиальная схема которых приведена на рисунке 1. Активными элементами этих установок, преобразующими электрические колебания в механические, служили магнитострикционные преобразователи. Механические колебания пакета возникают под воздействием переменного магнитного поля, возбуждаемого высокочастотными генераторами.

Эффективная работа преобразователей обеспечивается оптимальным уровнем подмагничивания постоянным магнитным полем. Для стендов, работающих на резонансной частоте 18 кГц использовались стандартные магнитострикционные преобразователи пакетного типа ПМС-15А-18, собранные из тонких пермендюрowych пластин. Для стендов, работающих на частотах 3 и 9 кГц были использованы специальные пакеты с вышеуказанными резонансными частотами и оригинальными активными элементами, набранными из никелевых (НП2) пластин.



1 – магнестриктор; 2 – концентратор; 3 – образец; 4 – камера для низких температур; 5 – камера для высоких температур; 6 – блок датчиков температуры; 7 – блок контроля и регулировки температуры; 8 – блок подмагничивания; 9 – усилитель; 10 – управляемый генератор; 11 – блок управления; 12 – бесконтактный датчик-вибромметр; 13 – осциллограф; 14 – частотомер

Рис. 1. Схема принципиальная комплекса осуществляющего нагружение в широком диапазоне частот и температур

Общий вид стенда с частотой колебаний 18 кГц приведен на рис. 2.



Рис. 2. Общий вид испытательного стенда на 18,0 кГц

Одной из проблем, влияющей на корректность результатов усталостных испытаний, является стабилизация амплитуды колебаний в процессе нагружения. Особенно остро этот вопрос стоит при использовании резонансного режима, так как изменение амплитуды колебаний может быть вызвано как изменением акустической мощности, подводимой к образцу, так и несовпадением частоты механического резонанса колебательной системы, обладающей острой характеристикой, с частотой тока генератора применяемого в схеме с независимым возбуждением. В связи с этим использовались установки с автоколебательным режимом работы, позволяющие по изменению резонансной

частоты изучать кинетику поврежденности образца. Проведенные сравнительные усталостные испытания различных материалов в условиях знакопеременного изгиба в диапазоне частот 0,3-18 кГц показали целесообразность использования высоких частот нагружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалев М.А., Овакимян Д.Н. Беспилотные летательные аппараты вертикального взлета. Сборка, настройка и программирование. Самарский национальный исследовательский Университет имени академика С.П. Королева. Россия, г. Самара, 2023 г. С. 92.
2. Блохин А.В., Царук Ф.Ф., Гайдук Н.А. Комплекс оборудования для усталостных испытаний элементов технологического оборудования //Труды БГТУ, серия П. – Мн.,2002. Вып.Х. – С.213-215.
3. Блохин А.В. Развитие комплекса оборудования для усталостных испытаний конструкционных материалов //Труды БГТУ, серия П. – Мн.,2004. Вып.ХІІ.– С.263-267.
4. Капсаров А.Г., Бельский С.Е., Чигринова Н.М. Особенности расчета элементов испытательного оборудования для получения сложного напряженного состояния в широком диапазоне частот//Современные методы проектирования машин: Труды II Межд. конференции. – Мн., 2004. – Т.4. – С.242-245.
5. Коновалов Е.Г., Дроздов В.М., Тявловский М.Д. Динамическая прочность металлов. – Минск: наука и техника, 1969. – 299 с.
6. Усталостные испытания на высоких частотах нагружения/ Под ред. Кузьменко В.А. – Киев: Наукова думка, 1979. – С. 335.

УДК 004.925, 620.179

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ БЛА

К.А. ПОПЛАВСКАЯ, А.Н.ТИПКО

Республиканское унитарное предприятие «Научно-производственный
центр multifunctionальных беспилотных комплексов»
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Для анализа состояния материалов силовых элементов конструкции беспилотного летательного аппарата (БЛА), их неразрушающей дефектоскопии были применены возможности современных методов рентгеновской компьютерной томографии (КТ) и 3D-моделирования.

Сканирование с помощью КТ позволило создать точную 3D-модель конкретной конструкции элементов БЛА, которая отображает: реальное расположение компонентов (включая отклонения от проектной документации), плотность и распределение материалов, зазоры, возможные перекосы и точки напряжения в конструкции БЛА.

Рентгеновские снимки компонентов БЛА открываются и изучаются в программе RadiAnt DICOM Viewer, что позволяет увидеть, как выглядят внутренние компоненты и структуры различных узлов и деталей БПЛА без удаления наружной обшивки. Полученные изображения представляются в формате DICOM M (Digital Imaging and Communications in Medicine) – стандарте для медицинской и промышленной визуализации.

Полученные КТ-снимки элементов БЛА загружаются в программу для обработки и 3D-реконструкции томографических изображений 3D-Slicer (рис. 1, 2).

Цель промежуточной обработки в 3D-Slicer:

3D-реконструкция внутренней структуры;

DICOM-снимки представляют собой набор двумерных слоев, но в 3D Slicer их можно преобразовать в объемную модель;

удаление шумов и артефактов сканирования;

подготовка к экспорту в программу для постобработки результатов сканирования (SolidWorks, Blender и т.п.).

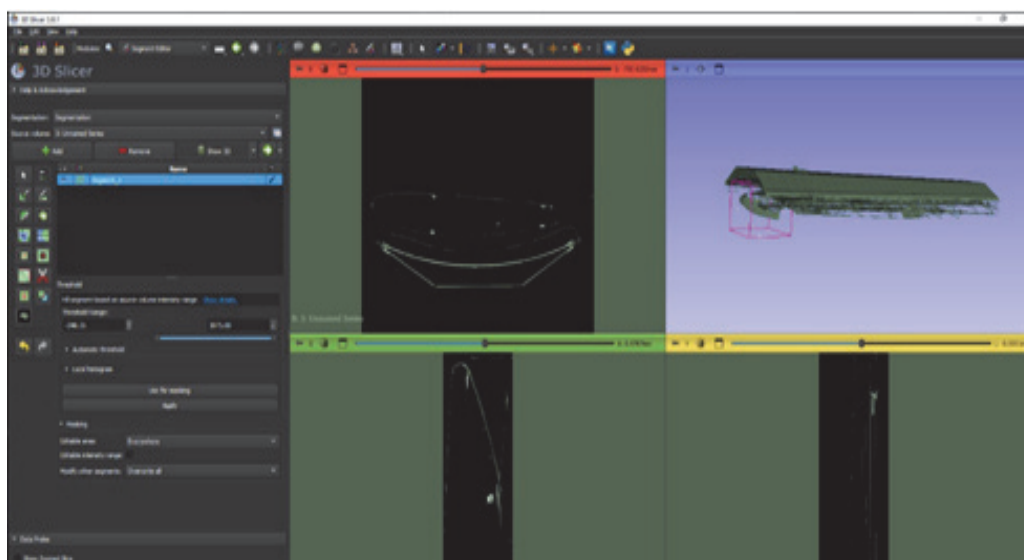


Рис. 1. Результаты сканирования полукрыла БЛА

Программа 3D Slicer позволяет конвертировать DICOM-данные в форматы файлов STL или OBJ. В данном примере использовалась программа Blender.

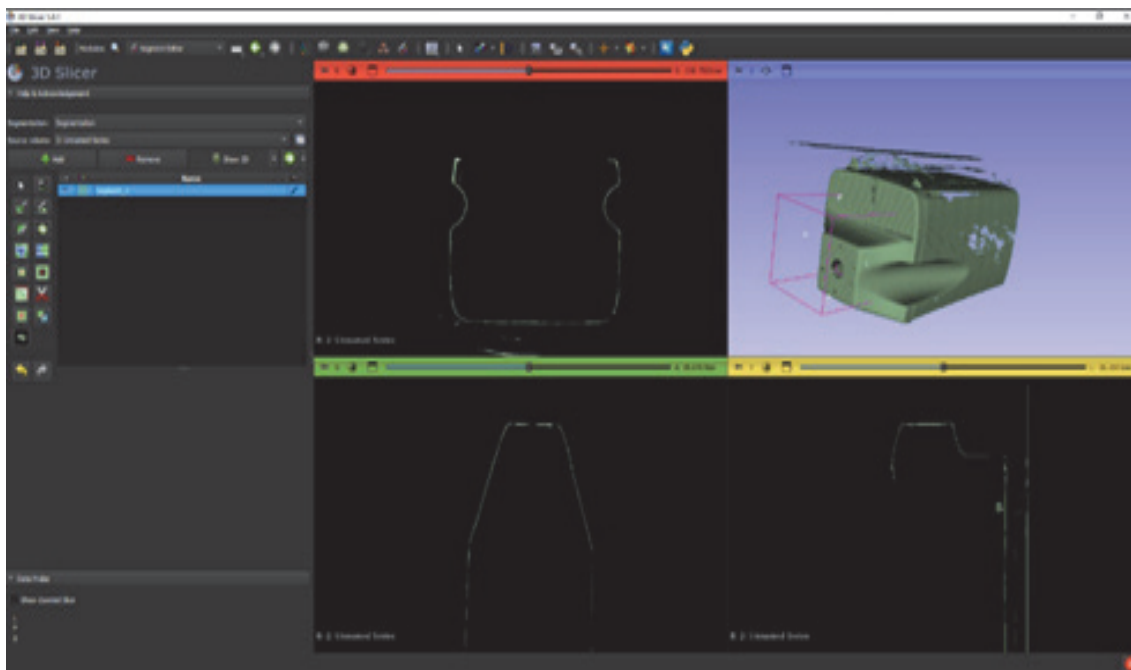


Рис. 2. Результаты сканирования части фюзеляжа БЛА

После открытия КТ-снимков в 3D-Slicer, производится экспорт в программу Blender 3D (профессиональное и открытое программное обеспечение для создания трехмерной компьютерной графики, включающее в себя средства моделирования). В данной программе производится оптимизация полученных изображений элементов конструкции БЛА: уменьшается количество полигонов с помощью ретопологии, удаляются шумы и артефакты, корректируется ориентация нормалей полигональных поверхностей (рис. 3, 4).

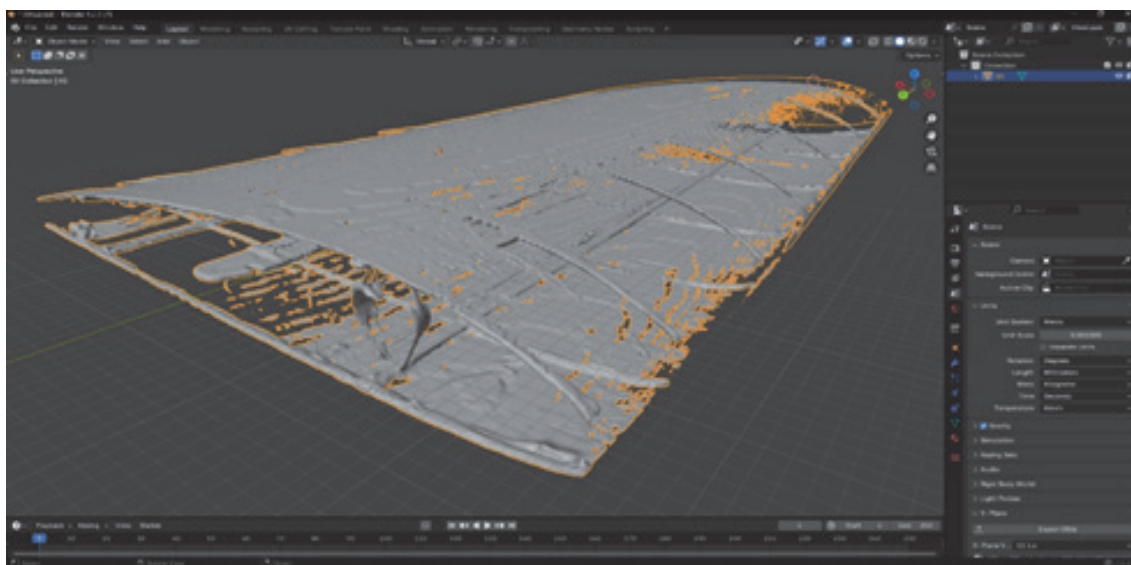


Рис. 3. Полученная 3D-модель полукрыла БЛА

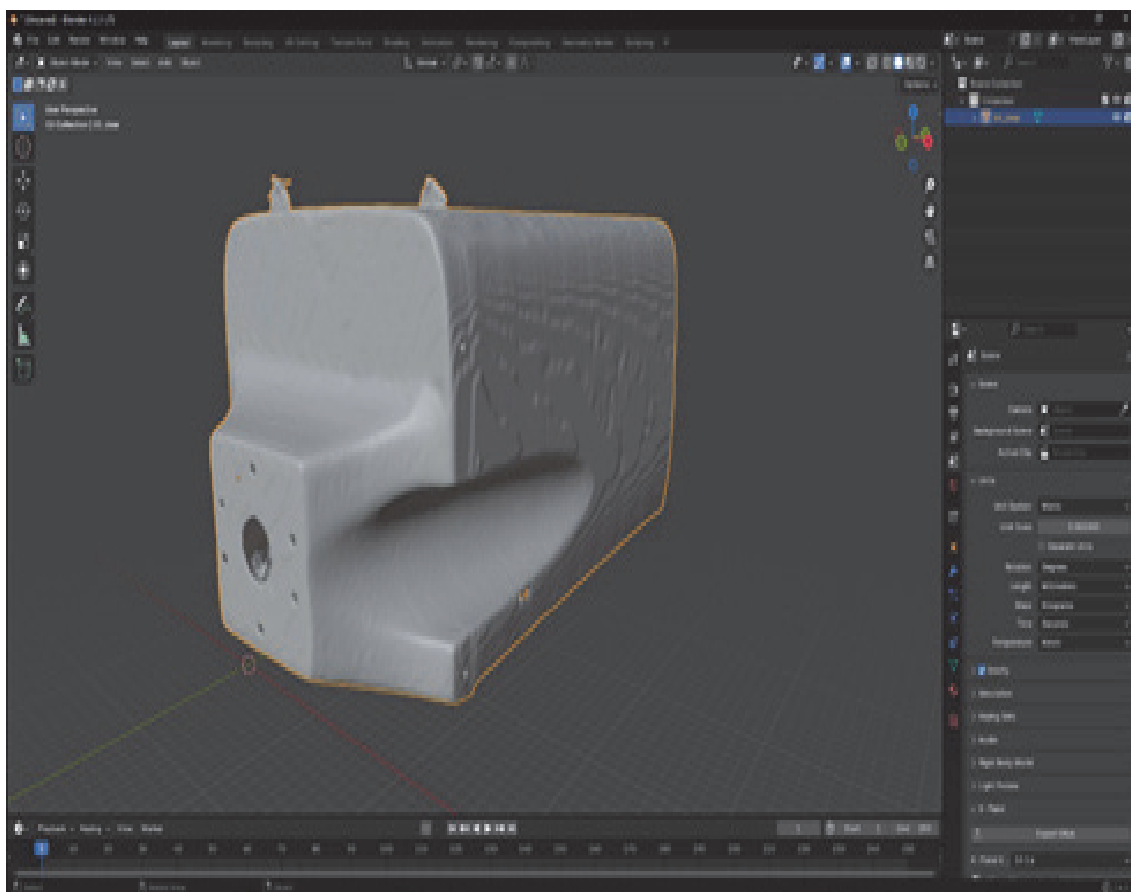


Рис. 4. Полученная 3D-модель части фюзеляжа БПЛА

Данный метод 3D-визуализации позволяет проанализировать конфигурацию, состояние внутренних компонентов элементов конструкции БЛА без его разборки, сохраняя целостность конструкции, а также создать их точные цифровые двойники и выявлять скрытые дефекты конструкции.

Таким образом, с помощью программ 3D-моделирования, медицинские технологии могут быть успешно использованы для оптимизации методов неразрушающего контроля качества при производстве и эксплуатации БЛА.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 18353–79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов.
2. Баранов, В. М. Испытания и контроль качества материалов и конструкций : учеб. пособие для вузов / В. М. Баранов, А. М. Карасевич, Г. А. Сарычев. – М. : Высш. шк., 2004. – 360 с.

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ВЫСОКООБОРОТИСТОГО БЕСКОЛЛЕКТОРНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

А.А. РАДКЕВИЧ¹, С.А. ПАВЛЮКОВЕЦ², А.А. ВЕЛЬЧЕНКО²

¹ГНУ «Объединённый институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси»

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

В современных беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) предъявляются высокие требования к силовой установке как к исполнительному механизму, отвечающему за управляемость дрона при полёте. Ключевым элементом силовой части является высокооборотистый электродвигатель, соединённый с винтом, формирующий винтомоторную группу БПЛА. В качестве электродвигателей на сегодняшний день получили распространение бесколлекторные электродвигатели постоянного тока (БДПТ) за счёт высокой плотности мощности и низкой массы. При этом для повышения быстродействия БПЛА возрастает потребность в повышении оборотов двигателей без увеличения потерь КПД и уменьшения надёжности конструкции. Достижение оптимального баланса между частотой вращения, нагревом элементов и механической прочностью БДПТ является залогом проектирования эффективного двигателя [1].

На мировом рынке представлена линейка высокооборотистых БДПТ различного типоразмера, мощности и частоты вращения, разработанных специально для винтомоторной группы БПЛА, которые характеризуются значением KV , определяющим число оборотов в минуту на вольт, и способностью выдерживать повышенные радиальные нагрузки. Однако при росте частоты вращения увеличиваются электромагнитные потери, вибрации и тепловые потери в обмотках и на магнитах.

Конструкции серийных моделей БДПТ для БПЛА, в основном, ограничиваются применением стандартных конфигураций обмоток и материалов узлов [2]. Зачастую такая унификация компонентов приводит к снижению КПД электродвигателя и сокращению его ресурса при интенсивной эксплуатации. В связи с этим актуальной темой представляется комплексная оптимизация конструкции высокооборотистых БДПТ для дронов, включающая модернизацию некоторых узлов двигателя,

параметров обмотки и схему теплоотвода, что позволит минимизировать теплопотери, уменьшить массу двигателя при сохранении требуемой жесткости конструкции.

В данном исследовании проведена оптимизация конструкции БДПТ на примере высокооборотистого двигателя серии 3115 900 KV для винтомоторной группы FPV-дронов. В качестве исходного двигателя взят образец двигателя производителя *Shenzhen NYBAO TECH Co., Ltd.* (КНР) с техническими характеристиками, приведенными в табл. 1.

Табл. 1. Технические характеристики электродвигателя марки 3115 900 KV производителя *Shenzhen NYBAO TECH Co., Ltd.*

Наименование параметра	Значение
Номинальное напряжение питания	14,8...22,2 В
Максимальная мощность	1768 Вт
Номинальный ток холостого хода	2,1 А
Максимальный ток холостого хода	2,5 А
Максимальный продолжительный ток	72,04 А
Частота вращения холостого хода	18500 об/мин
Максимальная тяга (сила подъёма)	4205 г
Максимальная эффективность	4,71 г/Вт
Максимальная рабочая температура при 15 с	44 °С
Габаритные размеры	37,1/47,8/16,8 мм
Масса	120 ± 3 г

Необходимо отметить, что характеристики БДПТ серии 3115 900 KV напрямую зависят от управляющего параметра загрузки — процентного значения, отражающего с какой силой тока контроллер подаёт сигнал на *ESC* (электронный регулятор оборотов) для увеличения частоты вращения двигателя. При регулировании данного значения от 50 % до 100 % значения мощности, частоты вращения, тока статора и тяги возрастают, а значение эффективности вначале возрастает, затем падает, достигая максимума в диапазоне 40–70 % загрузки.

Также существенное влияние на параметры работы двигателя, особенно на тягу, потребляемый ток, частоту вращения и эффективность оказывает диаметр и масса винта. С увеличением диаметра винта увеличивается тяга двигателя, однако возрастает статический момент на роторе, что влечёт увеличение тока в обмотках статора. Число лопастей также увеличивает тягу. Материал винта влияет на жёсткость винтомоторной группы, при этом жёсткие и лёгкие винты, такие как карбоновые, снижают вибрации и момент нагрузки.

В рамках предлагаемого подхода оптимизации конструкции электродвигателя типа 3115 900 KV предлагается сосредоточиться на

аспектах улучшения теплоотвода и снижения общей массы конструкции, нацеленной на уменьшение момента инерции винтомоторной группы, тем самым улучшив динамические показатели винта и БЛА в целом (время разгона и посадки, быстроту маневрирования).

На рис. 1, а) представлена модернизированная конструкция детали корпуса («колокола») электродвигателя серии 3115 900 KV, отличающаяся от аналогичного корпуса двигателя, серийно производимого компанией *Shenzhen NYBAO TECH Co., Ltd* увеличением площади теплоотвода за счёт изменения конфигурации вентиляционных отверстий на лицевой стороне корпуса с увеличением их площади, а также применением более лёгкого материала – алюминиевого сплава AA2618, имеющего плотность на 7 % ниже, чем у алюминиевого сплава марки 7075 Al в оригинальной конструкции «колокола», при этом демонстрирующего сопоставимую со сплавом марки 7075 Al прочность, твердость и обрабатываемость.

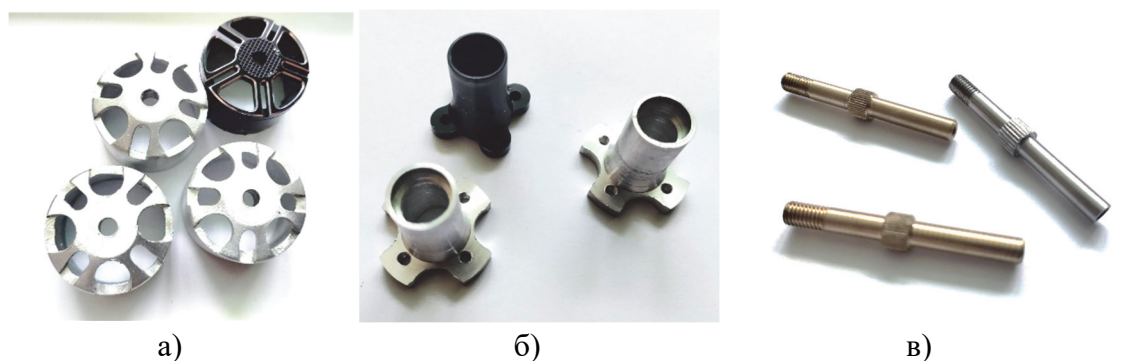


Рис. 1. Оптимизированные и серийные элементы БДПТ серии 3115: а) корпуса двигателей; б) основания двигателей; в) валы статоров

Аналогичным образом оптимизирована деталь основания для крепления двигателя к раме БПЛА (рис. 1, б), изготовленная из алюминиевого сплава марки 7075 Al с модернизированной конструкцией, а также вал статора (рис. 1, в), для которого применён высокопрочный алюминиево-бронзовый сплав С63000 с плотностью 7,6 г/см³ вместо термообработанной стали SUS420 — мартенситного нержавеющей сплава с высокой прочностью и износостойкостью, применяемого в конструкции вала двигателя 3115 от Shenzhen NYBAO TECH Co., Ltd.

Результаты оптимизации конструкции электродвигателя серии 3115 сведены в табл. 2.

В результате проведённого исследования, в соответствии с табл. 2, общая масса электродвигателя уменьшилась на 13,6 г (11,3 %). Изготовленный алюминиевый корпус («колокол») с увеличенной площадью

вентиляционных отверстий усиливает отвод тепла за счёт оптимизированных потоков воздуха, а также имеет массу почти в 2 раза ниже по сравнению с серийным образцом. Облегчённое основание двигателя позволило снизить массу неподдрессоренных деталей. Облегчённый вал статора из алюминиево-бронзового сплава уменьшил инерцию ротора. Совокупность этих изменений не повлияла на механическую прочность, однако заметно повысила эффективность теплообмена и динамические характеристики БДПТ.

Табл. 2. Сравнение характеристик компонентов БДПТ серии 3115 Shenzhen NYBAO TECH Co., Ltd и оптимизированной конструкции

Наименование параметра	Двигатель 3115 Shenzhen NYBAO TECH Co., Ltd	Оптимизированная конструкция двигателя 3115
Материал корпуса	алюминиевый сплав 7075 Al	алюминиевый сплав AA2618
Масса корпуса	26,675 г	13,919 г
Процент площади вентиляц. отверстий	55,1 %	64,4 %
Материал основания	алюминиевый сплав 7075 Al	алюминиевый сплав AA2618
Масса основания	5,524 г	5,188 г
Материал вала	сталь SUS420	алюминиево-бронзовый сплав C63000
Масса вала	5,527 г	5,018 г
Общая масса двигателя	120 г	106,4 г

Оптимизированная конструкция снижает нагрузку на винтомоторную группу и сокращает время разгона БЛА. Улучшенный теплоотвод сократил электромагнитные и тепловые потери, стабилизируя температуру при длительных полётах дрона. Повышение КПД двигателя достигается за счёт более равномерного температурного профиля и уменьшения сопротивления в узлах, что позволяет дольше эксплуатировать двигатель без падения тяги.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yaşa, Y. An efficient brushless DC motor design for unmanned aerial vehicles // Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi. – 2022. – №. 35. – P. 288-294. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1083838>.
2. Deepak, B. Design optimization of drone BLDC motor for delivery service applications / B. B. V. L. Deepak, D. P. Singh [et al.]// Materials Today: Proceedings. – 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.370>.

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Т.П. ФОКИН, А.А. КОРОЛЁВ, Д.С. КАРПОВИЧ

Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

На сегодняшний день беспилотные летательные аппараты всё больше проникают в разные сферы, что обостряет необходимость решения проблем, которые с ними возникают. Одной из значимых проблем является проблема надёжности систем управления и стабилизации беспилотных летательных аппаратов, которую можно разделить на внутреннюю и внешнюю составляющую.

Внутренней составляющей проблем надёжности является вибрация. Вибрация может влиять как на физическое соединение и износ внутренних элементов беспилотников, так и на показания некоторых датчиков и работу самих систем стабилизации аппарата.

Над данный момент проблемы вибрации решаются, чаще всего, при помощи гиростабилизаторов или иных гироскопических устройств, однако главным недостатком данного способа является сложность производства и масса подобных устройств. Уже существуют и иные разработки в данном направлении, однако их эффективность и надёжность всё ещё требует проверки. При этом следует принимать во внимание, что подобные решения призваны подавлять влияние вибрации только на определённые элементы беспилотника, к примеру, камеру. Также существует направление изучения применения вибростойких и виброподавляющих материалов в конструкции самих беспилотников, однако в отличие от систем подавления вибрации данное направление получает значительно меньше внимания. Также существует и гибрид в виде пассивных систем демпфирования, обычно в виде демпфирующих платформ.

Отдельно следует выделить подавление вибраций в квадрокоптерах, поскольку для них наиболее значительным источником вибрации является работа двигателей и правильная настройка параметров управления и использование подходящих алгоритмов позволяет в значительной степени решить проблему вибрации.

Внешней составляющей проблем надёжности является влияние радиопомех и иных магнитных полей на сами системы БПЛА. И если в

случаях работы беспилотников на малых скоростях или в малом диапазоне решением стало использование физического соединения, к примеру, при помощи оптоволоконного кабеля, то для работы на больших расстояниях подобный подход не является реализуемым. В то же время радиопомехи и слабый сигнал GPS в некоторых частях земного шара в принципе является проблемой, зачастую приводящей к потере или повреждению дорогостоящего оборудования.

На данный момент существует два наиболее перспективных направления:

1) Использование более надёжных и помехозащищённых протоколов и иных программных подходов, а также замена оборудования связи на более защищённые образцы.

2) Использование альтернативных методов навигации при помощи дополнительных датчиков и совершенствование аппаратной части беспилотника.

Ко второму подходу относится установка дополнительных камер, лидаров и радаров, использование топографических данных для навигации и даже навигации по карте звёздного неба для определённых регионов и иные способы позволяющие беспилотнику при потере связи либо вернуться в зону досягаемости либо предпринять иные действия по предотвращению аварийной ситуации вызванной потерей сигнала.

Таким образом можно сделать вывод что разработкой решений для обеих проблем занимаются, однако если проблема навигации и GPS рассматривается разносторонне, то к проблеме вибрации относятся более узконаправленно, что может негативно сказываться на прогрессе решений обеих проблем в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wei He, Suxia Zhang. Vibration Response Analysis of a Tethered Unmanned Aerial Vehicle System under Transient Wind Field – International Journal of Aerospace Engineering, 2024.

2. Hugo Yañez-Badillo, Francisco Beltran-Carbajal, Ruben Tapia-Olvera, Antonio Valderrabano-Gonzalez, Antonio Favela-Contreras, Julio C. Rosas-Caro. A Dynamic Motion Tracking Control Approach for a Quadrotor Aerial Mechanical System – Shock and Vibration, 2020

3. Pengfei Jiang, Xingshou Geng, Guowei Pan, Bao Li, Zhiwen Ning, Yan Guo, Hongwei Wei. GNSS Anti-Interference Technologies for Unmanned Systems: A Brief Review – Drones, Volume 9, Issue 5, 2025. – p. 349-360

ГИРОСТАБИЛИЗИРОВАННЫЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А.Н. ХРИБТЕНКО, С.В. ФИЛИПОВИЧ, Д.В. КАЦЕР
ОАО «Пеленг», Минск, Беларусь

ОАО «Пеленг» является ведущим проектно-конструкторским предприятием оптико-электронного приборостроения с полувековой историей, огромным интеллектуальным потенциалом, современной производственной базой и уникальными технологиями.

Основными видами деятельности ОАО "Пеленг" являются выполнение НИОКР и изготовление наукоемкой оптико-электронной продукции широкого спектра применения: съемочных систем дистанционного зондирования земли; оптико-электронных систем (ОЭС) для бронетанковой техники и средств ПВО; оборудования для криминалистики и метеорологии, определения утечек природного газа; авиационных ОЭС наблюдения и наведения.

ОЭС легкого класса представлены системой захвата и сопровождения объектов (СЗиСО), приведенной на рис. 1. Изделие позволяет вести наблюдение, поиск, обнаружение, распознавание и автосопровождение объектов интереса в видимом диапазоне длин волн. Изделие выполняет функции телевизионного координатора цели барражирующего боеприпаса. Основные технические характеристики СЗиСО приведены в табл. 1.



Рис. 1. СЗиСО

Табл. 1. Технические характеристики СЗиСО

Характеристика	Значение
Диапазон углов разворота по: азимуту углу места	от -110° до +110° от -90° до +10°
Разрешение изображения ТВ	1920 × 1080
Поле зрения (Г)	10°, 20°
Номинальное напряжение	14 В
Габаритные размеры (Д×В)	125×195 мм
Масса, не более	0,8 кг

В настоящее время ведется разработка гиросtabilизированной ОЭС легкого класса ГОЭС-М (рис. 2) с двумя каналами наблюдения (телевизионным (ТВ) и тепловизионным (ТПВ)) и лазерным дальномером. Изделие позволяет получать изображения местности и объектов в видимом, дальнем инфракрасном (ИК) спектральных диапазонах. Функциональные возможности данной целевой нагрузки позволяют автоматически сопровождать объекты интереса, измерять дальность, определять координаты и параметры движения объектов. Основные технические характеристики ГОЭС-М приведены в табл. 2.

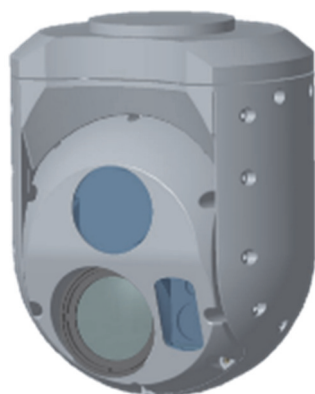


Рис. 2. ГОЭС-М

Табл. 2. Технические характеристики ГОЭС-М

Характеристика	Значение
Диапазон углов разворота по: азимуту углу места	от -170° до $+170^{\circ}$ от -125° до $+90^{\circ}$
Разрешение изображения ТВ	1920×1080
Поле зрения ТВ (Г)	$6,2^{\circ} - 57^{\circ}$
Оптическое увеличение ТВ	$10^{\times}$
Разрешение изображения ТПВ	640×512
Размер пикселя матрицы ТПВ	12 мкм
Поле зрения (Г) ТПВ	$12,5^{\circ}$
Длина волны ЛД	1,54 мкм
Диапазон измерения ЛД	0,02 - 5 км
Номинальное напряжение	14 В
Габаритные размеры (Д×В)	125×200 мм
Масса, не более	1,2 кг

К системам среднего класса относится авиационная система технического зрения (СТЗА) «Сыч» (рис. 3). Основными каналами наблюдения данного изделия являются: обзорная телевизионная камера, детальная телевизионная камера, охлаждаемая тепловизионная камера, лазерный дальномер.

Система прошла успешные испытания, в том числе в составе беспилотного авиационного комплекса, и получила положительные отзывы пользователей. Основные технические характеристики СТЗА приведены в табл. 3.



Рис. 3. СТЗА «Сыч»

Табл. 3. Технические характеристики СТЗА «Сыч»

Характеристики	Значение	
	СТЗА-1	СТЗА-2
Диапазон углов разворота по азимуту и углу места	$n \times 360^\circ$	
Стабилизация линии визирования	двухстепенная, 50 мкрад	трехстепенная, 20 мкрад
Разрешение изображения ТВ	1920 × 1080 (RGB)	
Поле зрения (Г) ТВ обзорной	2,3° - 63,7°	
Поле зрения (Г) ТВ детальной	4,0°; 8,0°	2,4°; 4,8°
Разрешение изображения ТПВ	640 × 512	
Поле зрения (Г) ТПВ	2,0° - 27°	
Длина волны ЛД	1,54 мкм	
Диапазон измерения ЛД	0,1 - 10 км	
Номинальное напряжение	27 В	
Габаритные размеры (Д×В)	250×340 мм	
Масса	12,8 кг	16 кг

В рамках ОКР ведется разработка ГОЭС тяжелого класса (рис. 4). ГОЭС-Т позволяет вести круглосуточный поиск, обнаружение, распознавание и автоматическое сопровождение объектов интереса. Изделие обеспечивает получение изображения местности и объектов в видимом, коротковолновом (SWIR) и средневолновом ИК диапазонах. Функциональные возможности позволяют измерять дальность, определять координаты и параметры движения объектов, выполнять лазерное целеуказание.



Рис. 4. ГОЭС-Т

Возможен выбор систем дальнометрирования с различными рабочими диапазонами длин волн, включая безопасные. Гиросtabilизированная платформа имеет четыре степени стабилизации. В табл. 4 приведены основные технические характеристики ГОЭС-Т.

Табл. 4. Технические характеристики ГОЭС-Т

Характеристика	Значение
Диапазон углов разворота по: азимуту углу места	$n \times 360^\circ$ от -100° до $+90^\circ$
Максимальная скорость наведения	$60^\circ/\text{с}$
Стабилизация линии визирования	10 мкрад
Разрешение изображения ТВ	1920×1080 (RGB)
Поля зрения (Г) ТВ	от $1,5^\circ$ до $31,5^\circ$ - обзорный, $0,76^\circ$ - детальный
Разрешение изображения SWIR	1280×1024 или 640×512
Поле зрения (Г) SWIR	1° или $0,5^\circ$
Разрешение изображения ТПВ	1280×1024
Поле зрения (Г) ТПВ	от $3,6^\circ$ до $25,6^\circ$ - обзорный, 1° - детальный
Длина волны ЛД / ЛДЦ	1,54 мкм / 1,06 мкм
Диапазон измерения ЛД	0,15 - 20 км
Номинальное напряжение	27 В
Габаритные размеры (Д×Ш×В)	$485 \times 525 \times 650$ мм
Масса	72 кг

В настоящее время ведутся работы по новым направлениям обработки видеoinформации с целью повышения функциональных возможностей оптико-электронных систем:

- обнаружение, распознавание и автосопровождение объектов интереса на основе искусственного интеллекта;
- комплексирование изображений различных спектральных диапазонов.

В линейке всех изделий имеются возможности по внесению конструктивных и функциональных изменений под запросы конкретных

потребителей. При поставке изделий заказчику предлагается комплектация программно-аппаратным комплексом для обучения операторов управления целевой нагрузкой.

Компания предлагает своим заказчикам полный спектр услуг по разработке, производству ОЭС и их интеграции на объектах заказчика, а также гарантийное и послегарантийное обслуживание.

УДК 623.746

ТОПЛИВО ДЛЯ БПЛА

М.О. ШЕВЧУК, С.Г. МИХАЛЁНОК

Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

С начала XXI века наблюдается стремительное развитие отрасли беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В 2024 году объём их продаж превысил 30 миллиардов долларов США. Согласно прогнозам, к 2030 году этот показатель может достичь от 90 до 260 миллиардов долларов, отражая динамичный рост спроса и масштабов производства.

В малогабаритных беспилотных летательных аппаратах применяются различные источники энергии, включая литий-полимерные аккумуляторы, солнечные панели и водородные топливные элементы. Для увеличения дальности полёта могут использоваться двигатели внутреннего сгорания или воздушно-реактивные установки.

Большинство воздушных судов, особенно в коммерческой авиации, используют авиационное топливо. При этом авиационный бензин применяется исключительно в летательных аппаратах с поршневыми двигателями – таких как сверхлёгкие воздушные машины и небольшие коммерческие самолёты. В результате его производство стало узкоспециализированной отраслью с ограниченными объёмами выпуска. В данной работе мы выделим пять ключевых факторов, критически важных для топлива, применяемого в авиации, включая беспилотные летательные аппараты:

- высокая детонационная устойчивость – значительно превышает аналогичный показатель у автомобильного топлива, что обеспечивает надёжную работу двигателя при высоких нагрузках;

- оптимальный фракционный состав – определяет температуру кипения и испаряемость бензина, влияя на эффективность его сгорания и стабильность работы двигателя;

– химическая инертность – топливо сохраняет свои свойства при длительном хранении и не вступает в нежелательные реакции, что важно для безопасности и надёжности;

– многофункциональность – способность топлива выполнять роль хладагента и смазки для трущихся деталей двигателя, снижая износ и повышая ресурс агрегатов;

– высокая удельная теплота сгорания — обеспечивает большую энергоотдачу на единицу объёма, что критично для повышения дальности и эффективности полёта.

В авиационных бензинах, выпускавшихся в СССР и Российской Федерации, в качестве традиционной высокооктановой добавки применялся тетраэтилсвинец (ТЭС). В связи с ужесточением экологического законодательства сначала отказались от ТЭС в бензинах для автомобилей, а затем и в авиабензинах: с 01.07.2003 года вступил в действие Федеральный закон от 22.03.2003 г. № 34-ФЗ «О запрете производства и оборота этилированного автомобильного бензина в Российской Федерации», в результате которого производства ТЭС в РФ было прекращено, а вместе с ним стало сокращаться производство авиабензина. В Беларуси автобензин с металло- и аминосодержащими октаноповышающими присадками, в том числе этилированный автомобильный бензин, не допускается к размещению на рынке с 01.07.2010 г. (Технический регламент «Автомобильный бензин и дизельное топливо. Безопасность», Постановление Совмина № 18 от 11.01.2010 г.) По состоянию на 2011 год производство авиационного бензина всех марок в РФ было прекращено, но в 2016 году ПАО «Газпром» возобновило производство авиабензина. В РФ производится авиационный бензин с пониженным содержанием ТЭС марки Avgas 100LL по ГОСТ Р 55493-2013.

Avgas 100LL – это высокооктановый этилированный авиационный бензин, обладающий детонационной стойкостью не ниже 99,6 по моторному методу. Он представляет собой прозрачную, легко воспламеняющуюся жидкость голубого оттенка с характерным запахом. Содержание свинца в топливе составляет 0,56 г/л. Данный вид бензина предназначен для эксплуатации в воздушных судах, оснащённых поршневыми двигателями с системой искрового зажигания.

На сегодняшний день бензин марки Avgas 100LL представляется наиболее подходящим вариантом для заправки беспилотных летательных аппаратов. Однако, в условиях ужесточения экологических требований и ограниченного доступа к данному виду топлива для сельскохозяйственных предприятий и лесных хозяйств Беларуси, заправка БПЛА будет осуществляться бензином, произведённым на белорусских нефтеперерабатывающих заводах с добавлением специальных присадок.

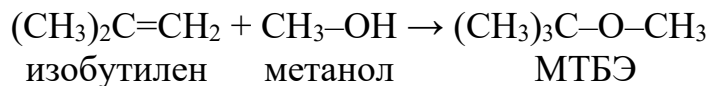
Значительную долю рынка занимают беспилотные летательные аппараты, работающие на топливной смеси из автомобильного бензина и моторного масла. Эти устройства отличаются низкими эксплуатационными затратами и способны продолжительное время выполнять поставленные задачи без необходимости дозаправки. Анализ эксплуатации БПЛА с поршневыми двигателями выявил ряд проблем, связанных с приготовлением топливной смеси, контролем её качества и процессом заправки. На сегодняшний день отсутствуют государственные нормативные акты, регулирующие прием и проверку качества бензина и масла, поступающих на склады ГСМ для использования в БПЛА. Это может негативно сказаться на сроке службы двигателя. [1, 2].

Низкомолекулярные кислородсодержащие соединения, как известно, обладают высоким октановым числом – вплоть до 100 по исследовательскому методу (ИОЧ). Далее будут рассмотрены три разновидности высокооктановых присадок.

Метил-трет-бутиловый эфир (МТБЭ) является самым распространённым кислородсодержащим компонентом с высоким октановым числом, применяемым в составе бензина. Его мировое производство превышает 25 миллионов тонн в год. МТБЭ представляет собой соединение с температурой кипения около 55°C, плотностью 0,76 г/мл и октановым числом 116. По исследовательскому методу его октановое число варьируется в пределах 115–135, а по моторному методу – 100–101.

МТБЭ способен повышать октановое число бензиновой смеси до 135 по исследовательскому методу (ИОЧ), в зависимости от углеводородного состава исходного топлива. Благодаря содержанию кислорода, МТБЭ способствует более полному и эффективному сгоранию топлива в цилиндрах двигателя, что улучшает его экономичность и снижает уровень вредных выбросов, связанных с неполным сгоранием.

Особо необходимо отметить, что сырьё для синтеза МТБЭ (*изобутилен* и метанол) производится в Республике Беларусь на ОАО «Мозырский нефтеперерабатывающий завод» (МНПЗ) и на ОАО «Гродно-Азот» соответственно. Синтез МТБЭ производится на МНПЗ в результате следующей реакции:



В США МТБЭ был недавно выведен из использования в связи с экологическими опасениями, связанными с возможным загрязнением грунтовых вод. Это решение привело к стремительному переходу на этанол, который стал альтернативным источником кислорода и средством повышения октанового числа в топливе.

Следом за МТБЭ, **трет-амилметиловый эфир (ТАМЭ)** занимает второе место по распространённости среди кислородсодержащих высокооктановых добавок, применяемых в бензине. Его октановое число составляет 104,5, плотность варьируется в пределах 0,76–0,78 г/см³, температура кипения – 85–86 °С, а температура вспышки – минус 7°С.

На наш взгляд очень перспективной высокооктановой присадкой в авиабензины является **2,5-диметилфуран** (октановое число 119 (ИОЧ)). 2,5-Диметилфуран, получаемый из биомассы, рассматривается как перспективный вид биотоплива. По эффективности он превосходит этанол благодаря на 40% более высокой плотности энергии – показателю, отражающему количество энергии, содержащейся в единице объёма вещества (в системе СИ измеряется в Дж/м³). Это соединение отличается химической стабильностью: оно не растворяется в воде и не поглощает влагу из окружающей среды. Диметилфуран обладает теплотворной способностью 33,7 МДж/кг, что превышает аналогичный показатель у этанола (26,9 МДж/кг), но уступает бензину (43,2 МДж/кг). Испытания бензинового двигателя с одним цилиндром показали, что термический коэффициент полезного действия при сгорании диметилфурана сопоставим с КПД при использовании бензина.

Выводы: для увеличения срока службы поршневых двигателей, используемых в беспилотных летательных аппаратах, необходимо повысить уровень контроля качества применяемого топлива. Следует использовать топливо с более высокой плотностью и энергосодержанием. Добавление присадок – масел и высокооктановых компонентов – к автомобильному бензину с целью получения авиационного топлива для БПЛА должно осуществляться квалифицированным персоналом в специально оборудованных помещениях, оснащённых вытяжной вентиляцией и мерной посудой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранец, Ю.Г. Качество топлива для БПЛА /Ю.Г. Баранец [и др.] // Сборник научных статей по итогам двенадцатой международной научной конференции Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности, 30–31 декабря 2020, Казань, ООО «Конверт», – Ч.1. – 2020. С. 19–22.

2. Баранец, Ю.Г. Заправка БПЛА – проблемы и пути решения /Ю.Г. Баранец [и др.] // Сборник научных статей по итогам четвертой международной научной конференции Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности, 29–30 апреля 2020, Казань, ООО «Конверт», – Ч. 1. – 2020. С. 32–34.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ

**А.И. СУРУС, А.В. БЛОХИН, С.Е. БЕЛЬСКИЙ,
М.Н. ПИЦОВ, А.М. ЛОСЬ**

**Белорусский государственный технологический университет,
Минск, Беларусь**

Механика высокоточных систем и механизмов – это область инженерной науки, где точность, надежность и устойчивость играют ключевую роль. Основные особенности, которые отличают такие системы от обычных технических решений:

- микро- и наномасштабы. Используются компоненты и узлы, работающие на микроуровне (например, микроэлектромеханические системы), что требует особого подхода к расчетам и материалам;
- высокая точность позиционирования. Применяются приводы и датчики, обеспечивающие точность до микронов и даже нанометров;
- мехатронный подход. Системы строятся на синергии механики, электроники и программного обеспечения. Это позволяет реализовать интеллектуальное управление и адаптацию к внешним условиям;
- минимизация люфтов и вибраций. Используются специальные материалы, демпфирующие элементы и конструкции, снижающие нежелательные колебания;
- учет термодформаций. Даже малейшие изменения температуры могут повлиять на точность. Поэтому в расчетах учитываются тепловые расширения, а конструкции часто включают термостабилизирующие элементы;
- использование композитных и умных материалов. Включение материалов с заданными свойствами (например, изменяющих форму под действием электрического поля) позволяет создавать адаптивные механизмы [1];
- цифровое моделирование и оптимизация. Применяются методы вычислительной механики, включая конечные элементы, топологическую оптимизацию и др. [2].

Отмеченные особенности высокоточных систем и механизмов определяют особенности проектирования их деталей.

Проектирование деталей точной механики требует высокой точности, глубоких знаний материаловедения, механики и технологии производства.

Ключевыми особенностями проектирования деталей точной механики, которые отличают этот процесс от общего машиностроительного проектирования являются:

- высокие требования к точности и допускам. Детали точной механики часто работают в условиях микроскопических зазоров. Требуются минимальные отклонения формы, размеров и положения – вплоть до микронов;

- применение материалов с высокой стабильностью. Материалы должны обладать высокой износостойкостью и стабильностью размеров. Используются сплавы с низким коэффициентом теплового расширения (например, инвар);

- минимизация деформаций. Конструкции проектируются с учетом внутренних напряжений, вибраций и термических воздействий.

Часто применяются специальные методы термообработки и стабилизации;

- технологичность изготовления. Детали должны быть пригодны для высокоточной обработки: шлифовки, электроэрозионной обработки, лазерной резки;

Учитываются возможности оборудования для обработки и контроля (станков с ЧПУ и автоматизированных систем контроля);

- сборка и юстировка. Проектирование включает допуски на сборку, возможность юстировки и компенсации погрешностей.

Часто применяются прецизионные соединения: натяг, вакуумная посадка, клеевые технологии;

- надежность и долговечность. Детали работают в условиях высокой цикличности, поэтому важно учитывать усталостную прочность.

Применяются методы прогнозирования ресурса и отказов.

Особенности проектирования деталей БПЛА заключаются в необходимости обеспечения оптимального баланса прочности, жёсткости и минимального веса путем использования легких и прочных материалов, таких как углепластики, стекловолокно и алюминиевые сплавы, а также в применении специальных методов производства для снижения себестоимости и выпуска небольших партий деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зуев Ю.А. Основы инженерной механики. – М.: Машиностроение, 2020.
2. Тетяев В.П. Вычислительная механика. – СПб.: БХВ-Петербург, 2021.

ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО СОЗДАНИЮ ТЕХНОЛОГИЧНОЙ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Д.В. АНТИПОВ, А.А. ТКАЧЕНКО

Самарский национальный исследовательский университет имени
академика С.П. Королева, Самара, Россия

Современные технологии стремительно развиваются, и одним из наиболее значимых направлений в области авиации является создание беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Эти устройства находят широкое применение в различных сферах, включая сельское хозяйство, охрану, мониторинг окружающей среды и т.д. С увеличением спроса на БПЛА возникает необходимость в организации серийного автоматизированного производства, которое позволит обеспечить высокое качество, надежность и доступность этих технологий.

Целью работы является разработка проектно-конструкторских решений конструкций БПЛА, основанных на оценке показателей технологичности.

ТКИ выражает не функциональные свойства изделия, а его конструктивные особенности. Конструкцию изделия характеризуют в общем случае состав и взаимное расположение его составных деталей, схема устройства изделия в целом, форма и расположение поверхностей деталей и соединений, их состояние, размеры, материалы и информационная выразительность [1].

Технологичность конструкции при роботизированной сборке представляет собой совокупность свойств, обеспечивающих возможность эффективного производственного процесса с использованием робототехнических комплексов (РТК).

Ниже приведены основные показатели технологичности, которые предъявляются к деталям при роботизированной сборки.

1. Следует сокращать число деталей в сборочной единице, путём изготовления ряда деталей как единого целого.

2. Детали и их конструктивные элементы должны быть стандартизованы. Следует конструировать группы деталей одного служебного назначения в соответствии с размерным рядом. Детали одной группы различаются только размерами, но имеют одинаковую форму и назначение, будучи составными частями изделий одной гаммы.

3. Детали не должны сцепляться друг с другом в процессе хранения, перемещения и подачи на сборочную позицию. Сцепление деталей в бункерах, лотках, магазинах может быть вызвано следующими причинами: наличием заусенцев и облоя.

4. Детали для удобства ориентации должны быть симметричными или существенно ассиметричными.

5. Детали должны иметь заходные фаски. Фаски, как было показано, значительно расширяют допуск отклонения расположения поверхностей или осей устанавливаемой и базовой деталей перед их сборкой. Наличие фасок значительно облегчает попадание в резьбу при свинчивании деталей вручную.

6. Детали должны иметь поверхности, удобные для захвата рабочими органами сборочного автомата. Эти поверхности должны иметь достаточно малые отклонения расположения относительно вспомогательных баз для базирующей детали и основных баз для устанавливаемой.

В проектировании универсальной платформы, [2] которая представлена на рисунке 1 применены проектно-конструкторские решения, позволяющие использовать для её сборки РТК.

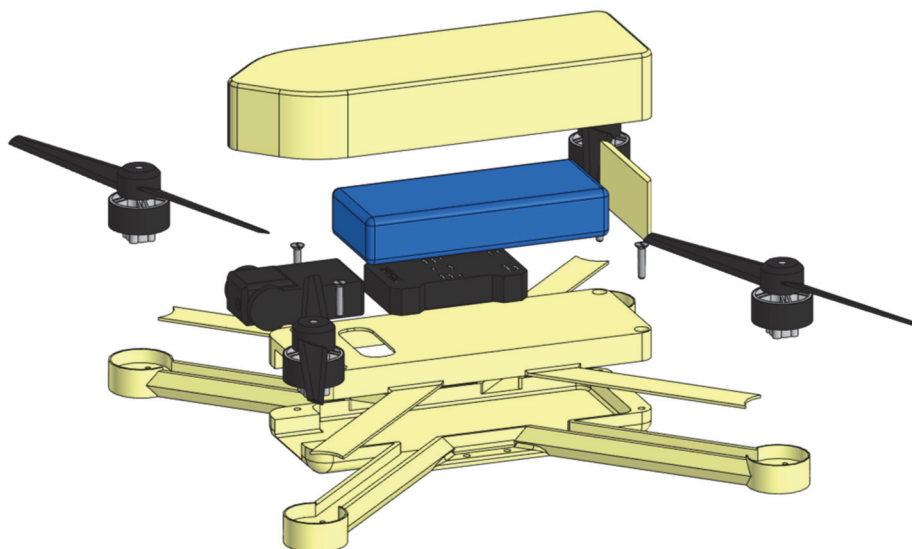


Рис.1 – Универсальная платформа БПЛА

Универсальная платформа представляет собой БПЛА роторного типа с расположением электронных компонентов и аккумуляторной батареи внутри корпуса. На корпусе расположены монтажные отверстия, позволяющие крепить модули полезной нагрузки под выполнения разных задач.

К данной конструкции применены проектно-конструкторские решения, которые представлены в таблицы 1.

Табл. 1. Проектно-конструкторские решения универсальной платформы БПЛА

№	Проектно-конструкторские решения	Основные показатели технологичности
1	• Корпус и крышка представляют собой единые детали, изготовленные с помощью технологии литья • Полётный контроллер объединён с регулятором оборотов и в конструкции отсутствуют паяные соединения	Следует сокращать число деталей в сборочной единице, путём изготовления ряда деталей как единого целого
2	• Корпусные детали предусматривают конструктивные элементы, с помощью которых осуществляется хранения в магазинах • Конструктив двигателей предусматривает хранения их в магазинах и установку с помощью захватов робота	Детали не должны сцепляться друг с другом в процессе хранения, перемещения и подачи на сборочную позицию.
3	• Корпус и крышка представляют собой симметричные детали	Детали для удобства ориентации должны быть симметричными или существенно ассиметричными
4	• В корпусе располагаются отверстия с фасками для фиксации винтами с крышкой	Детали должны иметь заходные фаски.
5	• В изготавливаемых деталях имеются места, которые позволяют перемещать их с помощью присоски на роботе • Перемещение покупных изделий осуществляется захватами на роботе	Детали должны иметь поверхности, удобные для захвата рабочими органами сборочного автомата

Внедрение предложенных решений позволяет: повысить производительность сборки, снизить себестоимость производства, обеспечить стабильность качества, сократить время вывода продукта на рынок.

Таким образом, проектирование конструкции БПЛА с учётом показателей технологичности является ключевым фактором успешного развития серийного производства в данной отрасли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Амиров Ю.Д. Технологичность конструкции изделия [Текст]: справочник / Ю.Д. Амиров. – изд. 2 перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 768 с.
2. Загидуллин, Р.С. Разработка концепции универсальной платформы беспилотного летательного аппарата на основе применения метода QFD [Текст] / Р.С. Загидуллин, А.А. Ткаченко, М.А. Михеев, А.К. Крюкова // Инновационное приборостроение. – 2024. - №4. – С. 14–21.

СОДЕРЖАНИЕ

III СЕКЦИЯ. ПОЛИМЕРНЫЕ, КОМПОЗИЦИОННЫЕ, МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ И СИЛИКАТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ СИСТЕМ. ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ И АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	3
<i>Аникеев А.Ф., Алифировец Г.В. СПЕЦИФИКА ОБРАБОТКИ СОВРЕМЕННЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ НА СТАНКАХ С ЧПУ</i>	<i>3</i>
<i>Баранцева С.Е., Климов Ю.А., Кравчук А.П. ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕЛОРУССКИХ БАЗАЛЬТОВ И ТУФОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО ВОЛОКНА</i>	<i>6</i>
<i>Волк А.М. ВИХРЕВОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ СУСПЕНЗИЙ.....</i>	<i>8</i>
<i>Дяденко М.В., Левицкий И.А., Гордейко А.Ч. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ИЗДЕЛИЯ В БЕСПИЛОТНЫХ СИСТЕМАХ</i>	<i>11</i>
<i>Егорова А.Л. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ОКРАСКИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ</i>	<i>15</i>
<i>Жилинский В.В., Милюкова А.М., Чаевский В.В. ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ БПЛА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ПОВРЕЖДЕНИЙ</i>	<i>16</i>
<i>Карпович О.И., Величко Г.А. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТЕКЛО- И УГЛЕНАПОЛНЕННЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ ДЛЯ ПЕЧАТИ ДЕТАЛЕЙ БЕСПИЛОТНОЙ ТЕХНИКИ.....</i>	<i>19</i>
<i>Карпович О.И., Величко Г.А., Вешторт Д.Ю. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ УГЛЕТКАНИ SW200 И ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ LR285</i>	<i>24</i>
<i>Карпович О.И., Величко Г.А. УНИВЕРСАЛЬНЫЙ КОПТЕР СО СКЛАДЫВАЮЩИМИСЯ ЛУЧАМИ</i>	<i>27</i>
<i>Курило И.И., Касач А.А., Богдан Е.О., Цыганов А.Р. СТРУКТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ СПЛАВОВ МАГНИЯ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ОКСИДИРОВАНИЯ</i>	<i>29</i>
<i>Касперович А.В., Шашок Ж.С., Долинская Р.М., Усс Е.П., Кротова О.А., Леишевич А.В., Боброва В.В. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ.....</i>	<i>33</i>
<i>Кубрак П.Б., Черник А.А., Богданов М.С. ФОРМИРОВАНИЕ АНОДНО-ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА СПЛАВАХ АЛЮМИНИЯ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ИМПУЛЬСНЫМ ТОКОМ</i>	<i>35</i>

<i>Латушкина С.Д., Гордиенко Д.Д., Куис Д.В., Сечко И.А., Чайкин А.А.</i> ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДАМИ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ОСАЖДЕНИЯ.....	39
<i>Лежнев С.Н., Чуманов И.В., Аникеев А.Н., Куис Д.В., Цыба П.Л., Арбуз А.С., Кузьмин С.Л., Чигиринский В.В.</i> ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ЛИТЬЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГЕТЕРОФАЗНОЙ ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННОЙ СТАЛИ.....	42
<i>Любимов А.Г., Прокопчук Н.Р., Говоровский В.О.</i> ПРИМЕНЕНИЕ АУКСЕТИКОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ КРЫЛА С ИЗМЕНЯЕМОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ.....	46
<i>Любимов А.Г., Касперович О.М., Ленартович Л.А., Петрушеня А.Ф.</i> ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ АУКСЕТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ В КОНСТРУКЦИИ БПЛА.....	50
<i>Любимова А.С., Петров Н.С.</i> ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ: НОВЫЕ ЭПОКСИДНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ.....	53
<i>Макарук А.А., Андрюхова М.В.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФАНЕРЫ В ТЕХНОЛОГИИ БЕСПИЛОТНЫХ СИСТЕМ.....	59
<i>Матыс В.Г., Бобрович О.Г., Поплавский В.В.</i> КОРРОЗИОННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16 ПОВЕРХНОСТНО- МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДАМИ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО АЗОТИРОВАНИЯ И ИОННО-АССИСТИРУЕМОГО ОСАЖДЕНИЯ ЦЕРИЯ.....	62
<i>Латышкевич И.А., Наркевич А.Л., Останин В.А.</i> ПРОИЗВОДНЫЕ СМОЛЯНЫХ КИСЛОТ И ТЕРПЕНОВЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ.....	65
<i>Мытько Д.Ю., Францкевич В.С., Ланкин Р.И.</i> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АППАРАТОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ГАЗОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БПЛА.....	69
<i>Ильющенко А.Ф., Лецко А.И., Николайчук Т.А., Кузнечик О.О., Парницкий Н.М.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ ОПТИМИЗИРОВАННЫХ ДЕТАЛЕЙ БПЛА.....	71
<i>Павлюкевич Ю.Г., Кравчук А.П., Климош Ю.А., Трусова Е.Е.</i> МОДИФИЦИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БАЗАЛЬТОВЫХ РАСПЛАВОВ ПУТЕМ ВВЕДЕНИЯ БОРСОДЕРЖАЩИХ КОМПОНЕНТОВ.....	75
<i>Павлюкевич Ю.Г., Панцевич М.В., Беднаровская У.В.</i> ТЕРМОСТАБИЛЬНЫЕ СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$	78
<i>Пянко А.В., Шунькина О.И., Черник А.А.</i> ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ НИКЕЛЕМ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ.....	80

<i>Цыба П.Л., Лежнев С.Н., Куис Д.В.</i> ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НИЗКОНИКЕЛЕВЫХ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ ТРИП СТАЛЕЙ.....	82
<i>Ширвель А.А., Поспелов А.В., Дяденко М.В.</i> ЗАЩИТНЫЕ КОНВЕРСИОННЫЕ ФОСФАТНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА СПЛАВАХ МАГНИЯ.....	85
IV СЕКЦИЯ. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ, ДВИГАТЕЛИ, ПРИВОДЫ, ЭЛЕКТРОНИКА, ПОДВЕСНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МОДУЛИ	90
<i>Блохин А.В., Бельский С.Е., Сурус А.И., Пищов М.Н., Лось А.М.</i> ПОДГОТОВКА ПРОФИЛЬНЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ В КОНТЕКСТЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БПЛА	90
<i>Боровский Д.Н., Козловский В.И., Цзюй Чень</i> ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	92
<i>Гринюк Д.А., Олиферович Н.М., Сухорукова И.Г., Андрухович Е.С.</i> ПОДАВЛЕНИЕ ПОМЕХ В СИСТЕМАХ СТАБИЛИЗАЦИИ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ	95
<i>Гринюк Д.А., Олиферович Н.М., Дейнека Т.А., Кустов Г.А.</i> ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ.....	99
<i>Гринюк Д.А., Олиферович Н.М., Оробей И.О., Ежиков Д.Ю.</i> АЛГОРИТМЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БПЛА.....	103
<i>Грудо С.К., Зыбин А.С.</i> К ВОПРОСУ ОБ ИЗУЧЕНИИ ПРИНЦИПОВ УПРАВЛЕНИЯ ШАГОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ СИСТЕМ.....	107
<i>Доброго К.В., Червинский В.Л., Каледник А.С.</i> ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФАКТИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ СБОРОК ЛИТИЙ-ИОННЫХ ЯЧЕЕК МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО	110
<i>Карпович Д.С., Оробей И.О., Сарока В.В., Чжен Юйтянь</i> ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГИРОСТАБИЛИЗИРОВАННОГО ОПОРНО-ПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА.....	116
<i>Касперович О.М., Говоровский В.О., Тишевич А.О.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ И 3D ПЕЧАТЬ БЫСТРОСЪЕМНОГО ЛЮЧКА ДЛЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ БПЛА.....	117
<i>Левадный А.Н., Яцына Ю.Ф., Максимова М.В.</i> ЛИНЕЙКА ОПТИЧЕСКИХ ЦЕЛЕВЫХ НАГРУЗОК РАЗРАБОТАННЫХ И СЕРИЙНО ВЫПУСКАЕМЫХ В РУП «НПЦ МБК» НАН БЕЛАРУСИ	118
<i>Маршалова Г.С., Сухоцкий А.Б.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ НА ОРЕБРЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ БПЛА	121

<i>Милов Ю.В., Милов В.Н., Милов Е.В.</i> РАЗРАБОТКА, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЯ ВЕНТИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ БПЛА С МОНОЛИТНОЙ НЕОДНОРОДНО НАМАГНИЧЕННОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ ИЗ МАГНИТОПЛАСТА НА ОСНОВЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДА Nd-Fe-B	124
<i>Пищов М.Н., Бельский С.Е., Блохин А.В., Сурус А.И., Лось А.М.</i> ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ БПЛА.....	127
<i>Поплавская К.А., Тупко А.Н.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ БЛА.....	130
<i>Радкевич А.А., Павлюковец С.А.</i> А.А. ВЕЛЬЧЕНКО ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ВЫСОКОБОРОТИСТОГО БЕСКОЛЛЕКТОРНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА	134
<i>Фокин Т.П., Королев А.А., Карпович Д.С.</i> ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ.....	138
<i>Хрибтенко А.Н., Филипович С.В., Кацер Д.В.</i> ГИРОСТАБИЛИЗИРОВАННЫЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	140
<i>Шевчук М.О., Михаленок С.Г.</i> ТОПЛИВО ДЛЯ БПЛА.....	144
<i>Сурус А.И., Блохин А.В., Бельский С.Е., Пищов М.Н., Лось А.М.</i> ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ	148
<i>Антипов Д.В., Ткаченко А.А.</i> ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО СОЗДАНИЮ ТЕХНОЛОГИЧНОЙ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА.....	150

Научное издание

БЕСПИЛОТНЫЕ АППАРАТЫ

Сборник статей
МЕЖДУНАРОДНОГО МОЛОДЕЖНОГО ФОРУМА
«БПЛА – 2025»

В 2-х частях
Часть 2

В авторской редакции

Компьютерная верстка *Е. А. Матейко*

Подписано в печать 25.09.2025. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать ризографическая.
Усл. печ. л. 9,1. Уч.-изд. л. 9,4.
Тираж 150 экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение:
УО «Белорусский государственный технологический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/227 от 20.03.2014.
Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.