

УДК 620.1

А.С. Титарева, В.Н. Кириллов, О.В. Старцев

**ПОВЕДЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ В ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ  
АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ  
ПКМ И СИСТЕМ ЛКП В УСЛОВИЯХ УМЕРЕННО ТЕПЛОГО КЛИМАТА**

*Приводятся результаты исследования полимерных композиционных материалов, используемых в элементах конструкций авиационной техники, в условиях длительного воздействия умеренно теплого климата.*

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, лакокрасочные покрытия, климатические факторы, элементы конструкций авиационной техники, неразрушающий контроль.

*Results of investigation of polymer composite materials, used in components of structures of aeronautical engineering under conditions of a long-term effect of temperate thermal climate are presented.*

**Key words:** polymer composite materials (PCM), paint coatings (PC), structural components aeronautical engineering, non-destructive testing.

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) в настоящее время находят широкое применение в различных отраслях техники, в том числе и в авиационной [1–4]. Анализ зарубежных источников, а также общие тенденции развития материаловедения показывают, что сегодня интенсивно ведутся разработки и исследования в области композиционных материалов [5].

Однако эти материалы под воздействием комплекса климатических факторов (температуры, влажности, солнечного излучения и др.) могут существенно изменять свои прочностные характеристики, что необходимо учитывать при проектировании изделий авиационной техники, предназначенных для эксплуатации во всеклиматических условиях. Необходимость учета воздействия климатических факторов на материал отражена в Авиационных правилах Ч. 25, п. 603. Согласно авиационным правилам, пригодность и долговечность материалов, используемых для изготовления деталей, поломка которых может отрицательно повлиять на безопасность, должны:

- определяться опытным путем или с помощью испытаний;
- соответствовать утвержденным техническим условиям (ТУ отраслей промышленности, военным ТУ или техническим стандартам), гарантирующим прочность и другие свойства, принятые в расчетных данных;
- оцениваться с учетом влияния окружающих условий, ожидаемых в эксплуатации, таких как температура и влажность [6].

Свойства полимерных материалов под влиянием климатических условий могут претерпевать необратимые и обратимые изменения, степень которых зависит от продолжительности эксплуатации и от того, в каких климатических условиях эксплуатируются изделия [2–4, 7].

Для полной оценки поведения материала в конструкции необходима оценка стабильности уровня основных служебных свойств в заданных

условиях эксплуатации. Взаимосвязь изменения прочностных свойств под воздействием внешних факторов (температуры, влажности, нагрузок) со структурными превращениями, происходящими в материале, позволяет получать как предварительную оценку уровня изменения свойств разрабатываемого материала, так и подтверждение его работоспособности в составе реальной конструкции [8].

Климатические испытания материалов проводятся в Московском и Геленджикском центрах климатических испытаний ВИАМ, расположенных согласно ГОСТ 16350 соответственно в зонах умеренного и умеренно теплого климата. По климатическим признакам Геленджикский центр (ГЦКИ) принадлежит к зоне повышенной коррозионной агрессивности атмосферы (9 баллов по ГОСТ 9.039). Атмосферно-испытательный полигон ГЦКИ площадью 1100 м<sup>2</sup> позволяет проводить всесторонние испытания отдельных узлов и элементов конструкций при одновременном воздействии климатических факторов и статических, динамических нагрузок [9, 10].

Натурные климатические испытания в ГЦКИ проходят многочисленные образцы материалов и изделия из них. В частности, проводятся исследования поведения материалов в элементах конструкций авиационной техники, изготовленных с применением ПКМ и систем лакокрасочных покрытий (ЛКП). Среди таких элементов – лопасть несущего винта вертолета (разработчик ОАО «МВЗ им. М.Л. Миля», изготовитель ОАО «Роствертол»). Лопасть проходит испытания в течение четырех лет. Выставлена лопасть на натурные климатические испытания на силовом полу ГЦКИ, на расстоянии 50 м от береговой кромки воды и консольно закреплена на стойке высотой 2 м (рис. 1). Стойка сохраняет вертикальное положение при установке лопасти, а также при приложении дополнительного изгибающего усилия к лопасти и при колебании температуры окружающей среды.



Рис. 1. Климатические испытания лопасти несущего винта вертолета Ми-28Н

В процессе испытаний контролируют массу, температуру поверхности, жесткость и эффективные прогибы лопасти в свободном состоянии и под действием нагрузки 70 Н. Дважды в год выполняют оценку состояния лопасти акустическим методом неразрушающего контроля. Проводят исследования эффективных упругих прогибов лопасти при воздействии статических нагрузок и климатических факторов. Измерение деформации лопасти осуществляют при помощи катетометра. На хорде лопасти в горизонтальном положении – начиная от места крепления – выбраны 17 реперных точек, по которым фиксируется изменение прогиба.

По полученным за этот период данным проведен многофакторный анализ. Проанализировано влияние температуры поверхности лопасти и метеорологических факторов (температуры окружающей среды, влажности, скорости ветра, интенсивности солнечной радиации) на прогиб лопасти.

Периодическими измерениями определено, что в летние солнечные дни температура поверхности лопасти под действием солнечной радиации превышает температуру воздуха на 30°C и достигает 64°C.

Исследованы сезонные упругие прогибы лопасти по величине смещения реперных точек. Проанализировано влияние температуры поверхности лопасти, температуры и влажности воздуха, скорости ветра, интенсивности солнечной радиации на прогиб лопасти. За 45 месяцев климатических испытаний выявлено монотонное увеличение собственного прогиба, достигающее 60–70 мм.

Оценку жесткости проводили путем определения времени, за которое лопасть совершает 50 колебаний. Для этого свободный конец лопасти отводился вверх на фиксированное расстояние, затем отпускался с одновременным включением секундомера. Фиксировалось время, за которое свободный конец лопасти 50 раз пересечется с уровнем, отмеченным на швартовой конструкции. За время испытаний период колебаний уменьшился не более чем на 2 с. Отсюда можно сделать

очень важный вывод о том, что жесткость конструкции в течение этого времени практически не изменилась и имеет тенденцию к увеличению.

Атмосферная влага может проникать внутрь изделия в местах соединения элементов конструкции и влиять на свойства и структуру материалов, входящих в ее состав. Конструкция лопасти такова, что между хвостовыми отсеками имеются зазоры, между которыми может скапливаться и удерживаться влага, что влияет на увеличение массы лопасти. В процессе испытаний отмечены колебательные изменения массы лопасти в пределах  $\pm 0,15\%$ .

Надежность деталей и агрегатов изделия зависят не только от свойств материалов, но и от наличия в них скрытых структурных неоднородностей, приводящих к отклонениям характеристик материала [11]. На полимерные композиционные материалы существенное влияние оказывают атмосферные факторы (температура, влажность, солнечная радиация, циклическое изменение температуры и др.), которые, являясь активаторами старения ПКМ, способствуют развитию физико-химических процессов в материалах и за время эксплуатации изделий (25–30 лет) могут существенно снизить их прочностные свойства [2–4, 12–14]. Для оценки целостности внутреннего состояния элементов конструкции каждые полгода проводился неразрушающий контроль акустическим методом. После 48 месяцев испытаний в материалах, применяемых для изготовления лопасти, дефектов не обнаружено, выявлены лишь отслоения лакокрасочного покрытия.

На протяжении четырех лет в ГЦКИ проходят натурные климатические испытания два радиопрозрачных обтекателя производства ОАО «ГНТК им. Г.М. Бериева», один из них – элемент сотовой конструкции, второй – монолитной конструкции. Проведение таких испытаний диктуется тем, что на первом этапе проектирования радиопрозрачных изделий выбирают конструкцию стенки (однослойная, многослойная и т. п.) и материалы, из которых она должна изготавливаться, учитывая условия работы изделия (силовые нагрузки, температура эксплуатации, климатические факторы и т. п.). При этом учитываются основные радиотехнические особенности стенки и осуществляются предварительные расчеты радиотехнических и прочностных характеристик изделия, определяются приемлемые пределы по массе и толщине слоев [7].

К радиопрозрачным обтекателям предъявляется комплекс разнообразных требований. Они должны обладать заданными радиотехническими характеристиками, от которых зависит точность и надежность работы радиолокационного оборудования, а также быть достаточно прочными и надежно защищать находящиеся под ними антенны от внешних воздействий (силовых, климатических и др.) на протяжении всего срока службы [15].



Рис. 2. Месторасположение участков с различными цветами покрытия на монолитном (а) и сотовом (б) обтекателях

На поверхность исследуемых обтекателей нанесена эмаль белого и синего цветов. Месторасположение участков с различными цветами покрытия указано на рис. 2. Обтекатели закреплены на горизонтальных атмосферных стендах на открытой площадке.

В ходе испытаний радиопрозрачных обтекателей ежедневно проводят контроль температуры внутренней и наружной поверхностей обтекателей при помощи портативного тепловизора и автоматически [16], неразрушающий контроль – акустическим методом дважды в год и один раз в год – неразрушающий контроль диагностическим методом.

Температуру поверхностей замеряют в характерных точках на участках поверхностей, окрашенных в синий и белый цвет, три раза в день. Максимальные температуры изделий зафиксированы в июле 2011 года на участках, окрашенных в синий цвет; нагрев внешних поверхностей достиг  $+60^{\circ}\text{C}$  на сотовом обтекателе и  $+58^{\circ}\text{C}$  – на монолитном; температура окружающей среды в момент измерений была  $+34,8^{\circ}\text{C}$ . Нагрев внутренних поверхностей обтекателей (на этих же участках) достиг  $+51^{\circ}\text{C}$  на сотовом обтекателе и  $+59^{\circ}\text{C}$  – на монолитном. При этом температура воздуха внутри сотового обтекателя была  $+36,5^{\circ}\text{C}$ , внутри монолитного:  $+38,5^{\circ}\text{C}$ .

Минимальные зарегистрированные температуры изделия отмечены в феврале 2011 года. До минимального значения  $-8,3^{\circ}\text{C}$  температура опустилась на внешней поверхности монолитного обтекателя с ЛКП белого цвета, температура внутренней поверхности в этом же месте была  $-2,4^{\circ}\text{C}$ . На сотовом обтекателе температура внешней поверхности с белым ЛКП опустилась до  $-7,8$  и  $-3,2^{\circ}\text{C}$  – на внутренней поверхности в этом же месте. Температура окружающей среды при проведении измерений составляла  $-9^{\circ}\text{C}$ , внутри обтекателей температура воздуха была  $-1^{\circ}\text{C}$ .

Акустический контроль проводили при помо-

щи импедансного дефектоскопа. При контроле выявлены внутренние дефекты, по два в каждом обтекателе, размеры дефектов не превышают  $4\text{ см}^2$ , такие дефекты допустимы при эксплуатации конструкций.

При диагностическом методе неразрушающего контроля применяли ультразвуковой дефектоскоп-томограф. В качестве информативных параметров измеряли продолжительность распространения упругих колебаний и амплитуду донного импульса ультразвуковых колебаний (УЗК) в конкретных выбранных зонах контроля. Изменение продолжительности и амплитуды соответствует изменению скорости и затухания УЗК в объекте контроля, которые изменяются при изменении структуры ПКМ в процессе экспозиции элементов конструкций авиационной техники. Установлено незначительное изменение параметров диагностики:  $1\text{--}2\%$  за 15 мес.

Анализ данных диагностического метода неразрушающего контроля показывает, что воздействие умеренно теплого климата на протяжении четырех лет не оказывает значительного влияния на структуру материалов, в свою очередь, это дает возможность судить о том, что при воздействии температурных факторов, свойственных умеренно теплому климату, прочностные характеристики материалов, применяемых для изготовления обтекателей, не меняются. По результатам контроля температуры можно сделать вывод о том, что ни градиенты, ни разогрев поверхностей, достигаемые в условиях умеренно теплого климата, не влияют на радиотехнические характеристики конструкций.

Лакокрасочные покрытия служат защитой материалам от агрессивного воздействия окружающей среды, некоторых механических повреждений, загрязнений различного рода. Но лакокрасочные покрытия – как и любые полимерные материалы – подвержены воздействиям факторов окружающей среды.

Условия эксплуатации изделий, изготовленных из полимерных композиционных материалов, могут быть очень разнообразны, поэтому и защитные системы лакокрасочных покрытий должны обеспечивать работоспособность и внешний вид изделий в условиях повышенной влажности, воздействия температуры, УФ-излучения, а для этого они должны обладать специальными характеристиками (оптическими, эрозионной стойкостью, пожаробезопасностью, стойкостью к агрессивным жидкостям и др.) [17]. В течение девяти с половиной лет в ГЦКИ проходят испытания три лопасти винтовентиляторов: одна окрашена покрытием на основе эпоксидной эмали, две покрыты полиуретановой эмалью. Лопасти установлены вертикально на стенде на открытой атмосферной площадке.

Для исследования декоративных свойств и стойкости к загрязнению ЛКП лопастей винтовентиляторов, изготовлены образцы-свидетели с аналогичными системами ЛКП. Образцы-свидетели раз в месяц подвергаются обработке загрязняющим составом и экспонируются в натуральных климатических условиях. Испытания проводят по следующей схеме: на шесть образцов-свидетелей с полиуретановым покрытием и на шесть с покрытием на основе эпоксидной эмали наносят сажемасляную смесь, два образца с полиуретановым покрытием и два с покрытием на основе эпоксидной эмали оставляют чистыми. В таком виде все образцы-свидетели выставляют на экспозицию на открытой атмосферной площадке. После экспонирования с восемью образцами-свидетелями смывают загрязняющий состав двумя способами:

– *I способ* – с четырех образцов, два из которых покрыты полиуретановой эмалью и два с покрытием на основе эпоксидной эмали, смесь смывают сначала водным раствором детского мыла, промывают дистиллированной водой, затем протирают бензином;

– *II способ* – с аналогичных четырех образцов-свидетелей загрязнения удаляют моющим средством и промывают дистиллированной водой.

Остальные четыре образца оставляют загрязненными. Просушив все образцы в течение суток в комнатных условиях, измеряют оптические характеристики лакокрасочных покрытий.

После 6 мес. испытаний полиуретановое ЛКП практически не изменило своих декоративных характеристик, максимальные изменения замечены на образцах без смыва загрязняющего состава. Цвет на них изменился на 1 единицу, а блеск уменьшился на 20 единиц. Тогда как на покрытии на основе эпоксидной эмали цвет на загрязненных образцах изменился на 2 единицы, а блеск уменьшился на 95 единиц и отмечено меление; на остальных образцах цвет изменился в среднем на 1,5 единицы, а блеск – на 90 единиц.

Очевидно, что полиуретановое покрытие устойчиво к загрязнениям и воздействиям агрессивных факторов окружающей среды.

Срок службы покрытия на основе эпоксидной эмали ~2 лет. Результаты испытаний показали, что изменение декоративных характеристик без ухода за ЛКП более значительны, чем при уходе с использованием моющих средств. Можно сделать вывод о том, что уход с использованием моющих средств может продлить срок службы покрытия на основе эпоксидной эмали в среднем до 4 лет.

По результатам проведенных исследований разработаны стандарт организации, технологическая рекомендация и внесены дополнительные сведения в паспорта на эмали.

Результаты исследований поведения материалов в элементах конструкций авиационной техники, изготовленных с применением ПКМ и систем ЛКП, при длительных сроках натуральных климатических испытаний позволяют обоснованно назначать календарные и межремонтные сроки эксплуатации АТ. Стандарт организации устанавливает порядок проведения натуральных испытаний элементов конструкций из полимерных композиционных материалов и может применяться для получения данных, используемых при определении календарного срока службы и ресурса конструкций при воздействии климатических факторов; исследования изменения массы, изменения температуры нагрева поверхностей конструкций, изготовленных с применением ПКМ и систем лакокрасочных покрытий (ЛКП) различного цвета, в зависимости от сезонных изменений климатических факторов; определения изменения эффективного модуля упругости нагруженных конструкций при воздействии статических нагрузок в зависимости от сезонных изменений климатических факторов; оценки декоративных свойств ЛКП на ПКМ в элементах конструкций и др. Разработанная технологическая рекомендация устанавливает порядок и сроки профилактического ухода за ЛКП при эксплуатации авиационной техники, что позволяет продлить срок службы деталей АТ с системами ЛКП. Применение разработанной технологической рекомендации позволит сократить выброс летучих веществ в атмосферу при проведении ремонта ЛКП, так как она позволяет увеличить межремонтные сроки для ЛКП при эксплуатации авиационной техники.

Обеспечение безопасности эксплуатации авиационной техники предъявляет крайне жесткие требования к надежности материалов, используемых в конструкциях. Установлено, что наиболее существенное влияние на техническое состояние техники оказывает не механический износ деталей, а процессы коррозии и старения конструкционных материалов под совместным воздействием факторов окружающей среды: температуры, влажности, солнечной радиации. Одним из важнейших критериев, по которым производится выбор материалов на этапе разработки эскизного проекта изделия, является их стойкость к воздействию климатических факторов.

Для оценки ресурса изделий из ПКМ необходима информация, получаемая при исследовании образцов материалов, а также конструктивных элементов и агрегатов [18]. Предупреждение возникновения отказов и неисправностей, а также повышение качества конструирования самолетов на современном этапе развития авиационной техники связаны с испытаниями образцов материалов и типовых элементов конструкции во всем диапазоне рабочих условий и нагрузок, что позво-

ляет заложить основу будущей работоспособности агрегатов самолета. Исследование безотказности и ремонтпригодности вариантов конструкций на натуральных и конструктивно-подобных моделях часто становится источником информации при разработке принципиально новых решений. Данные, полученные при экспериментальных исследованиях материалов и элементов систем и конструкций, позволяют еще на стадии разработки выявить неудачные решения [19].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
2. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения //Деформация и разрушение материалов. 2010. №11. С. 19–26.
3. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. II. Релаксация исходной структурной неравновесности и градиент свойств по толщине //Деформация и разрушение материалов. 2010. №12. С. 40–46.
4. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы старения //Деформация и разрушение материалов. 2011. №1. С. 34–40.
5. Гращенков Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 231–242.
6. Авиационные правила. Ч. 25, п. 603. 2003. С. 67.
7. Гуртовник И.Г., Соколов В.И., Трофимов Н.Н., Шалгунов С.И. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков. М.: Мир. 2002. С. 160, 231.
8. Кириллов В.Н., Старцев О.В., Ефимов В.А. Климатическая стойкость и повреждаемость полимерных композиционных материалов, проблемы и пути их решения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 412–423.
9. Кириллов В.Н., Титарева А.С., Старцев О.В. Климатические испытания лопасти несущего винта вертолета Ми-28Н /В сб. докл. IX Междунар. научн. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон-2012». Ч. II. М. 2012. С. 209–211.
10. Каблов Е.Н., Кириллов В.Н., Жирнов А.Д., Старцев О.В., Вапиров Ю.М. Центры для климатических испытаний авиационных ПКМ //Авиационная промышленность. 2009. №4. С. 36–46.
11. Мурашов В.В. Определение физико-механических характеристик и состава полимерных композиционных материалов акустическими методами //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 465–475.
12. Ефимов В.А., Шведкова А.К., Коренькова Т.Г., Кириллов В.Н. Исследование полимерных конструкционных материалов при воздействии климатических факторов и нагрузок в лабораторных и натуральных условиях //Труды ВИАМ. 2013. №1. (электронный журнал).
13. Старцев О.В., Аниховская Л.И., Литвинов А.А., Кротов А.С. Повышение достоверности прогнозирования свойств полимерных композитных материалов при термовлажностном старении //ДАН. 2009. Т. 428. №1. С. 56–60.
14. Антипов В.В., Старцев О.В., Сенаторова О.Г. Закономерности влагопереноса в СИАЛах //Коррозия: материалы, защита. 2012. №3. С. 13–18.
15. Колпаков Н.С., Семенов А.А., Девин К.Л., Хрюкин А.П. Перспективные радиопрозрачные композиционные материалы на основе изотропных наполнителей для обтекелей антенных устройств летательных аппаратов, в том числе гидроавиации /В сб. докл. IX Междунар. научн. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон-2012». Ч. II. М. 2012. С. 118–121.
16. Старцев О.В., Медведев И.М., Кротов А.С., Панин С.В. Зависимость температуры поверхности образцов от характеристик климата при экспозиции в натуральных условиях //Коррозия: материалы, защита. 2013. №7. С. 43–47.
17. Семенова Л.В., Козлова А.А. Лакокрасочные покрытия для защиты полимерных композиционных материалов //Труды ВИАМ. 2013. №4. (электронный журнал).
18. Кириллов В.Н., Ефимов В.А. Проблемы исследования климатической стойкости авиационных неметаллических материалов /В сб. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007. М.: ВИАМ. 2007. С. 379–388.
19. Анцеилович Л.А. Надежность, безопасность и живучесть самолета. М.: Машиностроение. 1985. 201 с.