

Гайдачук В.Е., Карпов Я.С., Кириченко В.В.,
Капустин А.А., Николаев А.Г., Проценко В.С.

КОМПЛЕКС МАТЕМАТИЧЕСКОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПАНЕЛЕЙ НЕСУЩИХ ПОВЕРХ-
НОСТЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Одним из перспективных путей дальнейшего совершенствования летательных аппаратов (ЛА) является снижение их массы при повышении надежности, ресурса, технологичности и эксплуатационных характеристик.

Как показывает мировой опыт и анализ теоретических, а также экспериментальных исследований в области проектирования и технологии производства ЛА, реализация этого перспективного направления их совершенствования в значительной степени связана с широким внедрением полимерных композиционных материалов (КМ), обеспечивающих высокие эксплуатационные характеристики многофункциональных панелей несущих поверхностей ЛА.

Многофункциональность панелей как основного конструктивного элемента ЛА состоит в том, что кроме основной функции - восприятия и передачи силовых эксплуатационных воздействий, они выполняют и ряд других не менее важных функций, совмещение которых при их учете в процессе проектирования и производства позволяет снизить массу без ухудшения служебных характеристик.

К числу наиболее важных дополнительных функций относятся звукоизоляция борта и кабин пассажирских самолетов, а также защита конструкции от негативного воздействия среды эксплуатации эффективными покрытиями.

Эффективная звукоизоляция борта и кабин пассажирских самолетов непосредственно связана с разработкой методов и методик проек-

тирования звукоизолирующих панелей салонов пассажирских самолетов с высокими акустическими свойствами, которыми обладают полимерные и композиционные материалы.

В связи с этим в рамках разработанного комплекса математического и экспериментального обеспечения проектирования многофункциональных панелей были получены следующие основные результаты.

Выведены зависимости для определения коэффициентов потерь и звукопоглощения в модельных панелях произвольной структуры в зависимости от частоты, что существенно снижает, по сравнению с известными методами, трудоемкость их определения и повышает их точность.

Разработаны методики прогнозирования звукоизоляции натуральных панелей по испытаниям их модельных образцов при двух основных концепциях их проектирования - для автономных и включенных в силовую схему фюзеляжа.

Предложены новые критерии: наименьших потерь, эффективного звукопоглощения и отсутствия резонанса в регламентированной области частот, впервые позволившие однозначно установить абсолютное и относительное совершенство реальных панелей по испытаниям их базовых модельных образцов.

Предложены две концепции преднапряженных звукоизолирующих панелей, в соответствии с которыми разработаны математические модели ортотропных плоских и цилиндрических панелей из КМ, учитывающие осевые и сдвигающие усилия.

Проведен анализ эффективности пассивной преднапряженности панелей для типовых зон герметичных и негерметичных фюзеляжей, разработаны рекомендации по выбору рациональных структур и схем армирования несущих стенок панелей и шумопоглощающих заполнителей из полимерных КМ и пенопластов, предложены новые эффективные конструктивно-технологические решения (КТР) панелей на основе воспе-

ненных гранул пенопласта ПСБ в вязко-пластичной среде полимерного связующего и герметиков, специального зигобразного заполнителя из полимерной бумаги, а также различных их сочетаний.

Разработана и обоснована новая методика интегрального учета акустических особенностей малогабаритных реверберационных камер, обеспечивающая принципиальную возможность проводить нетрудоемкие экспериментальные исследования фрагментов панелей с допустимыми погрешностями.

Предложены и разработаны новые подходы к поиску рациональных КТР звукоизолирующих панелей на уровнях материала, конструктивных элементов, панели и конструкции фюзеляжа с учетом выявленных факторов влияния и средств их реализации, позволившие предложить ряд новых решений, обеспечивающих рост звукоизоляции на 3...7 дБ по сравнению с существующими панелями интерьеров.

Проведен обзор, анализ и систематизация 156 натуральных панелей, для которых имеются экспериментальные данные по звукоизоляции на соответствующих частотах. Для этого банка данных на базе предложенного критерия разработано программное обеспечение поиска рациональных КТР при конкретных ограничениях по поверхностной массе, звукоизоляции и диапазону частот.

Основные результаты этих исследований в виде методик рационального проектирования звукоизолирующих панелей, рекомендаций по выбору материала и КТР панелей для конкретных зон фюзеляжа и интерьеров, а также математического и программного обеспечения переданы для использования на предприятия авиационной промышленности.

Эффективность защитных покрытий независимо от их функционального назначения зависит от межслойной трещиностойкости.

Механика разрушения покрытий в настоящее время разработана недостаточно, а для покрытий, наносимых на КМ, отсутствуют как

теоретические результаты, так и эксперимент.

В связи с этим разрабатывается приборный комплекс для определения межслойной трещиностойкости системы "покрытие-основа" роликовым индентором и теоретические основы его реализации.

Исследована математическая модель покрытия на основе МКЭ и ряда критериев предельного состояния. Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) покрытия в процессе внедрения роликового индентора позволил предложить методику качественного и количественного сравнения трещиностойкости класса упругих покрытий по критерию работы отслоения. Полученные теоретические результаты значительно расширяют возможности приборного комплекса для определения характеристик констант системы "покрытие-основа".

Важной проблемой создания эффективных многофункциональных панелей ЛА из КМ является обеспечение надежных металло-композитных гетерогенных структур (МКГС) как универсальных конструктивных элементов стыков и соединений.

Анализ условий работы и формирования этих структур позволил сделать прогноз направлений повышения их эффективности, сформулировать и обосновать следующие принципы конструирования МКГС, а также критерии их реализации:

- сохранение целостности арматуры КМ при формировании МКГС и установке крепежных элементов;
- обеспечение съема (передачи) усилий с минимально возможного объема КМ в направлении армирования;
- миниатюризация крепежных элементов и обеспечение воспроизводимости требуемого качества их установки в серийном производстве;
- интегрирование МКГС в конструкцию из КМ при ее формировании.

Сформулированные принципы конструирования и критерии полноты их реализации являются научной основой создания МКГС как универсального конструктивного элемента для стыков и соединений. На

базе этих принципов предложены новые КТР МКТС, защищенные авторскими свидетельствами на изобретение и разработана структурно-логическая схема синтеза конструктивно-технологических параметров агрегатов, уточняющая и конкретизирующая состав и содержание основных этапов проектирования ЛА.

Для оценки качества многофункциональных панелей несущих поверхностей ЛА из КМ и определения НДС при механических, тепловых, вибрационных нагрузках в рамках комплекса разработаны методики высокоточных лазерных измерений.

Основным отличием предлагаемых методик является разработка и использование методов, совмещающих основные преимущества голографической и спекл-интерферометрии: наглядность, бесконтактность, высокая точность, чувствительность, большой объем информации на одном материальном носителе, пониженные требования к когерентности источников излучения, механической стабильности установки, разрешающей способности регистрирующих сред, возможность диагностики и измерений объектов большой площади.

Проведены экспериментальные исследования по определению НДС и неразрушающего контроля различных образцов из КМ типа стекло-, угле-, боро- и органопластиков вблизи сложных вырезов, ослаблений, непроклеев, трещин и других концентраторов напряжений.

Положительные результаты проведенных исследований (диапазон измерения перемещений - $0,5 \pm 100$ мкм, диапазон измерения деформаций $-10^{-5} \div 10^{-3}$, относительные погрешности измерения перемещений - 0,5%, деформаций - 10%) свидетельствуют о высокой эффективности предлагаемых методик. Это дало возможность разработать функциональную схему и приступить к созданию специализированного голографического измерительного комплекса для исследования НДС и неразрушающего контроля многофункциональных панелей из КМ, в состав которого входят: основание-плита с рабочей поверхностью 1500x2500 мм,

лазеры ЛГН-215 и ЛГН-503, мощностью излучения 50 мВт и 1,5 Вт, соответственно, зеркала, объективы, призмы, расширители лазерного излучения, специализированные устройства для создания механических, тепловых, вибрационных и других воздействий.

Не менее важной представляется задача поведения многофункциональных панелей из КМ при температурных воздействиях.

В связи с этим в рамках созданного комплекса проведено исследование термоупругого состояния КМ на математической модели слоя с конечным числом круговых цилиндрических включений.

Исследованы основные плоские термоупругие задачи для полуплоскости и полосы с одним или несколькими круговыми включениями. Решения этих задач строятся в виде суперпозиции точных решений уравнения Ламе для полуплоскости и круга. Граничные условия реализуются методом теорем сложения, который выражает решения в одной криволинейной системе координат через решения в другой. Исходные задачи сведены к бесконечным системам линейных алгебраических уравнений. Установлены условия разрешимости этих систем. Асимптотическими методами получены приближенные решения систем, на основе которых исследовано НДС вблизи включений. Приведен анализ влияния геометрических параметров на характер распределения напряжений.

Разработанный комплекс математического и экспериментального обеспечения проектирования многофункциональных панелей ЛА из КМ позволяет существенно повысить эффективность проектируемых конструктивных элементов за счет углубленной детализации анализа влияния важных эффектов, что косвенно обеспечивает повышение надежности, ресурса и технологичности панелей при снижении их массы.