

И. О. КОТОВЩИКОВ, канд. техн. наук
ООО «Локус» (Санкт-Петербург, Россия)

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ АКТИВНОГО ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА КОМПОЗИТНЫХ АВИАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ

Аннотация. Обобщён опыт ООО «Локус» по разработке и внедрению систем активного теплового контроля авиационных изделий из композиционных материалов. Рассмотрены «Локотерм-В» для вертолётных лопастей, «Локотерм-А» для крупногабаритных изделий сложной формы, «Локотерм. Компакт» для обнаружения воды в сотовых конструкциях при техническом обслуживании и ремонте (ТОиР) и проект мобильной системы «Локотерм-М». Показана адаптация единой аппаратно-программной платформы к различным объектам и стадиям жизненного цикла. Результаты «Локотерм-В» подтверждены ультразвуковым контролем и контрольным разрезом; «Локотерм. Компакт» выявляла воду объёмом от 0,05 мл при длительности цикла контроля 7 с.

Ключевые слова: активный тепловой контроль, активная термография, композиционные материалы, авиационные конструкции, автоматизированный неразрушающий контроль, ТОиР.

Введение

Композиционные материалы широко применяются в авиационной технике благодаря высокой удельной прочности и жёсткости, коррозионной стойкости и возможности формировать конструкцию с заданным сочетанием свойств. Таким образом, угле- и стеклопластики, сотовые заполнители и клеевые соединения позволяют снижать массу летающих конструкций без снижения эксплуатационных свойств. Однако, неоднородность, анизотропия свойств и высокие требования к соблюдению технологических процессов создают новые и высокие требования к контролю качества композитных авиационных объектов.

Неразрушающий контроль (НК) необходим на всех стадиях жизненного цикла. При изготовлении требуется выявлять расслоения, непроклеи, отслоения обшивки, поры, пустоты и включения; при эксплуатации — ударные повреждения, разрушение клеевых связей и воду в сотовых конструкциях. Большая площадь, криволинейность поверхности, малая толщина слоёв и односторонний доступ ограничивают применение распространённых локальных контактных методов НК и повышают актуальность площадных бесконтактных средств контроля [1–3].

При активном тепловом контроле (АТК) объект подвергается управляемому нагреву, а инфракрасная камера регистрирует нестационарное температурное поле поверхности. Дефект изменяет распространение тепла внутри объекта контроля (ОК) и формирует отличающийся по амплитуде и времени отклик. Диагностическая информация содержится во всей

последовательности термограмм, поэтому современная система АТК объединяет источник возбуждения, инфракрасную камеру, синхронный сбор данных, позиционирование и алгоритмы обработки [1, 3]. К общим свойствам всех рассматриваемых систем относятся бесконтактность, отсутствие контактной жидкости, односторонний контроль и цифровое документирование. Особенности отдельных кейсов определяются не этими свойствами, а способом адаптации метода к реальному объекту.

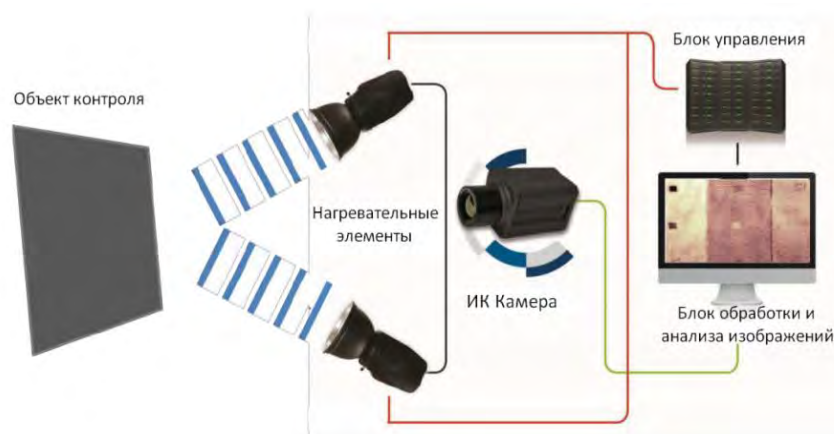


Рис. 1. Принцип активного теплового контроля и общая структура систем АТК

Целью работы является обобщение опыта ООО «Локус» по разработке и внедрению систем активного теплового контроля, адаптированных к различным авиационным композитным объектам и условиям проведения контроля.

1 Общая аппаратно-программная платформа

Все системы семейства «Локотерм» используют галогенные источники нагрева, камеру длинноволнового ИК-диапазона (LWIR камера) и общую программную платформу «Ассессор Термо». Она управляет сбором данных, обрабатывает термограммы, выделяет индикации по заданным критериям и формирует отчет; параметры повторяющихся процедур сохраняются как рецепты. Единое аппаратно-программное ядро позволяет адаптировать механику и компоновку к объекту.

2 «Локотерм-В»: производственный контроль вертолётных лопастей

Постановка задачи. Для длинномерных лопастей сложной внутренней структуры требовалось автоматизировать поиск расслоений, непрочных, отслоений, пустот и дефектов нагревательной накладки как в стеклопластиковых, так и в углепластиковых конструкциях. Локальные методы зависели от шага сканирования и квалификации оператора.

Решение. «Локотерм-В» выполнена как установка с двумя моторизованными осями, перемещающими термограф над лопастью. Реализованы контроль выбранного участка, пошаговое сканирование всего

изделия, сшивка термограмм отдельных участков в общую термограмму лопасти и отдельный режим нагревательной накладки. Инженер создаёт рецепт и критерии оценки, оператор выполняет повторяемую процедуру, а результаты сохраняются в электронном протоколе [4].

Особенность и результат. В отличие от остальных кейсов система глубоко специализирована под повторяющуюся конструкцию лопасти и отдельные зоны её внутреннего строения. Выявленные отслоения и пустоты подтверждены ультразвуковым контролем и резом образца в координате индикации [5].



Рис. 2. Система ATK лопастей «Локотерм-В»: а – Общий вид; б – окно ПО «Ассессор Термо» с выделением выявленных дефектов

3. «Локотерм-А»: крупногабаритные композитные изделия

Постановка задачи. Для цилиндрических и конических изделий диаметром до 2,5 м и высотой до 2 м требовалось контролировать всю поверхность при изменяющейся кривизне. Основными проблемами стали поддержание расстояния и угла наблюдения, координация нагрева и регистрации и объединение локальных термограмм.

Решение. Система включает рельсовый путь, поворотный стол, портал и два независимо перемещающихся манипулятора с термографом и внешним нагревателем. Шесть моторизированных осей позиционируют оборудование и объект; оптические датчики используются для коррекции положения относительно поверхности. Реализованы одно- и двусторонняя схемы ATK, построение и воспроизведение траекторий сканирования, сшивка термограмм и формирование отчёта.

Особенность и результат. Специфической особенностью является адаптивное пространственное согласование нескольких осей с криволинейной поверхностью крупногабаритного объекта. Система прошла испытания, отладку и вводится в эксплуатацию. Выполняется комплексное сопровождение заказчика в Перми, анализ обратной связи и регулярное обновление программного обеспечения.

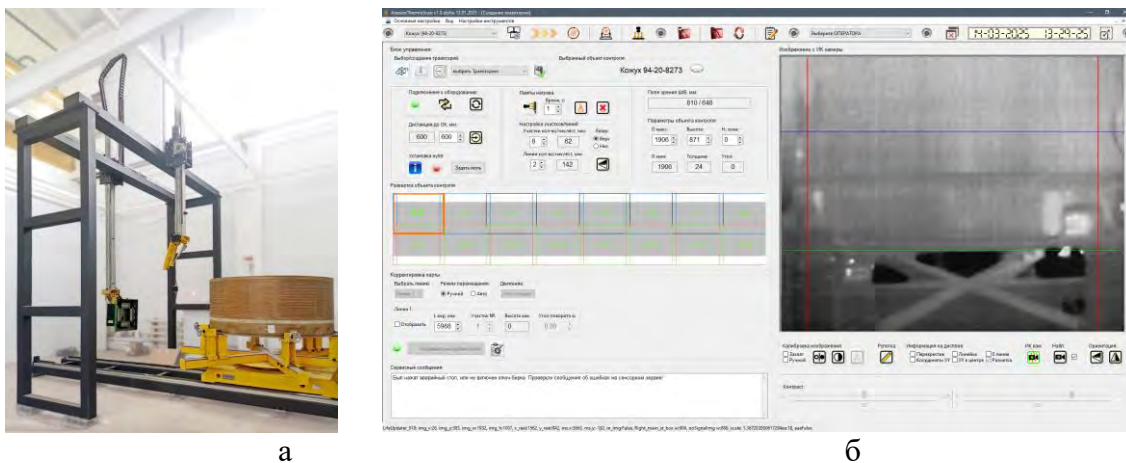


Рис. 3. Система АТК крупногабаритных тел вращения «Локотерм-А»: а – Общий вид; б – окно ПО «Ассессор Термо» для построения траектории сканирования

4. «Локотерм. Компакт»: контроль сотовых конструкций при ТОиР

Постановка задачи. При техническом обслуживании и ремонте воздушных судов требуется оперативно искать воду в сотовых панелях рулей, закрылков, обтекателей и других элементов. Вода изменяет теплоёмкость локальной области, а при замерзании может повреждать наполнитель и клеевые связи. Контроль должен выполняться при одностороннем доступе в ангарных условиях [6, 7].

Решение. В переносном корпусе объединены LWIR камера, две кольцевые галогенные лампы и вычислительный модуль. Съёмные опоры воспроизводимо задают рабочее расстояние; масса дефектоскопа с вычислителем и опорами составляет около 5,5 кг. Экспериментальные исследования возможностей разработанной системы были проведены на трёх вариантах сотовых панелей с дозированным введением воды.

Контраст оценивали как

$$C(t) = \frac{I_d(t) - I_{6d}(t)}{I_{6d}(t)},$$

где I_d и I_{6d} — сигналы дефектной и бездефектной областей.

Выявлялась вода объёмом от 0,05 мл. Рациональный режим включал нагрев в течение 2 с и общую регистрацию – 7 с; при области контроля (одной термограммы) 280×400 мм расчётная оперативность контроля превышает 30 м²/ч.

Особенность и результат. В отличие от автоматизированных установок современность решения выражена в полном измерительном цикле внутри лёгкого переносного прибора и стандартизации ручной установки опорами. Система прошла испытания, принята заказчиком и передана в эксплуатацию в июне 2026 г. На данный момент система «Локотерм. Компакт» осваивается персоналом и внедряется в практику ТОиР.

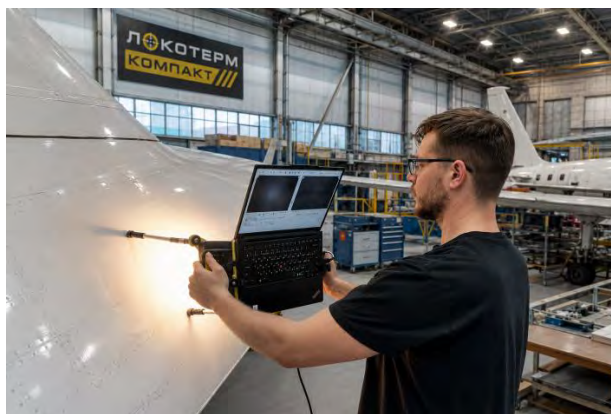


Рис. 4. Система оперативного эксплуатационного АТК воздушных судов «Локотерм. Компакт»

5. «Локотерм-М»: проект мобильного контроля лопастей

Постановка задачи. Сервисным центрам требуется контролировать лопасти воздушных и рулевых винтов непосредственно в месте эксплуатации, по возможности без снятия. Результаты должны быть сопоставимы с заводским контролем и доступны специалистам изготовителя.

Решение. Проект предусматривает термографический блок с четырьмя галогенными лампами на разборной ферменной оснастке с вертикальными направляющими. Оснастка должна обеспечивать последовательное позиционирование напротив вертикально установленной лопасти, разбираться после работы и перевозиться в кейсе; предусмотрена адаптация для не вертикальных ОК.

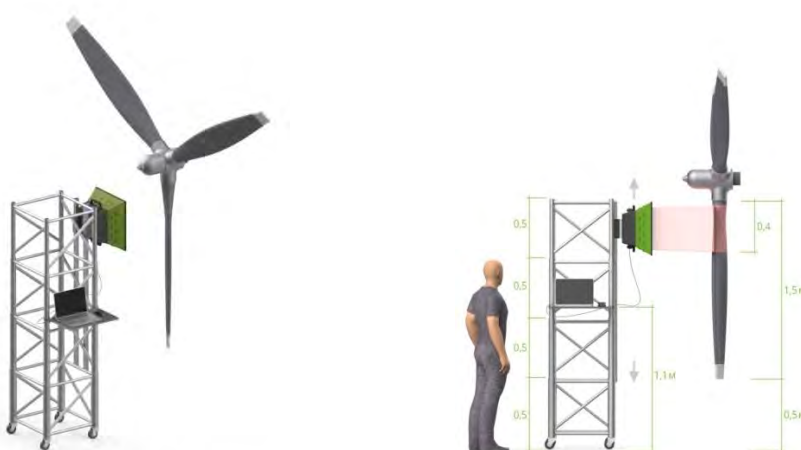


Рис. 5. Проект мобильной системы контроля лопастей «Локотерм-М»

Особенность и ожидаемый эффект. Главная особенность состоит в преимущественности производственного и эксплуатационного контроля: совместимые рецепты, централизованное хранение и экспертный анализ

создают основу цифровой истории состояния лопасти. «Локотерм-М» является проектным решением и не рассматривается как изготовленная или испытанная система.

Заключение

Компанией ООО «Локус» разработано семейство систем активного теплового контроля для производственного контроля лопастей и крупногабаритных композитных изделий, а также для задач ТОиР сотовых авиационных конструкций.

Выявляемость дефектов системой «Локотерм-В» подтверждена ультразвуковым контролем и контрольным разрезом; «Локотерм-А» сдана заказчику и вводится в эксплуатацию. «Локотерм. Компакт» выявляла воду объёмом от 0,05 мл при регистрации 7 с и передана заказчику.

Перспективное направление развития — объединение производственных и эксплуатационных данных в цифровую историю изделия, предусмотренное проектом «Локотерм-М».

Список литературы

1. Kotovshchikov I. O. Active thermography as a contemporary method for ensuring the quality of composite material products // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 683. Art. 012076. DOI 10.1088/1757-899X/683/1/012076.
2. ГОСТ Р 56787–2015. Композиты полимерные. Неразрушающий контроль. Общие принципы. Москва: Стандартинформ, 2016.
3. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. Москва: Спектр, 2009. 544 с.
4. Котовщиков И. О. Автоматизированный комплекс неразрушающего контроля лопастей из композитных материалов // Композитный мир. 2020. № 4(91). С. 46–50.
5. Федоров А. В., Котовщиков И. О. Экспериментальная апробация средств и методики активного теплового контроля вертолётных лопастей из композиционных материалов // Приборы. 2022. № 9(267). С. 1–7.
6. Vavilov V. P. et al. Detecting water ingress in aviation honeycomb panels: qualitative and quantitative aspects // Polymer Testing. 2016. Vol. 54. P. 270–280. DOI 10.1016/j.polymertesting.2016.07.023.
7. Чулков А. О. и др. Обнаружение и оценка количества воды в горизонтально ориентированных авиационных сотовых панелях с помощью автоматизированного теплового контроля // Дефектоскопия. 2023. № 12. С. 26–33. DOI 10.31857/S0130308223120035.

Контакты:

ilya@locus.spb.ru (Котовщиков Илья Олегович)