
Не разрушающий контроль образцов ПКМ для авиационных конструкций с использованием лазерно-ультразвуковой измерительной системы

С.А. Смотров, А.В. Смотров, А.Н. Кускова, Ю.В. Мантрова, А.Ю. Юрьев
ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского, Жуковский

В ЦАГИ разработана комплексная инновационная технология неразрушающего контроля для обнаружения и количественной оценки ударных повреждений композитных конструкций ВС, в первую очередь, повреждений, малозаметных глазу инспектора, на основе использования ударочувствительного индикаторного полимерного покрытия с оптическими свойствами и лазерно-ультразвуковой измерительной системы. Технология предназначена для целевого применения в авиационной и других отраслях промышленности как импортозамещающая отечественная разработка.

Non-destructive testing of PCM samples for aircraft structures using a laser-ultrasonic measuring system

S.A. Smotrova, A.V. Smotrov, A.N. Kuskova, Ju. V. Mantrova, A. Yu. Yuriev
TsAGI, Zhukovsky, Russia

TsAGI has developed a comprehensive innovative non-destructive testing technology for detecting and quantifying impact damage to composite aircraft structures, primarily damage that is barely noticeable to the inspector's eye, based on the use of an impact-sensitive indicator polymer coating with optical properties and a laser-ultrasonic measuring system. The technology is intended for targeted use in aviation and other industries, as an import-substituting domestic development.

1. Введение

Для обеспечения безопасности полетов воздушных судов (ВС) все полученные повреждения должны быть своевременно диагностированы. Возникновение в авиаконструкциях из полимерных композиционных материалов (ПКМ) ударных повреждений сопровождается расслоением и растрескиванием внутренних слоев с существенным ухудшением прочностных характеристик.

Одним из способов достижения этой цели является прогнозирование и обоснование высокой прочности и живучести изготовленных из ПКМ элементов ВС. Значительное влияние на эти свойства оказывает возможность обнаружения эксплуатационных повреждений ударного характера. Актуальность вопроса обусловлена не только значительным увеличением доли конструктивных элементов ВС из ПКМ, но и существенным отличием физических процессов деформирования и разрушения металлов и ПКМ.

В настоящее время в России и за рубежом общепринятым подходом для обеспечения прочности композитных авиаконструкций по условиям живучести является классификация эксплуатационных повреждений по пяти категориям в зависимости от степени и надежности их обнаружения при

визуальном контроле. Для каждой категории установлены требования по статическим и усталостным нагрузкам, которые должна выдерживать конструкция ВС при эксплуатации вплоть до момента обнаружения повреждения.

Одним из основных критериев прочности конструкций ВС из ПКМ по условиям допускаемых повреждений является минимальный размер малозаметного ударного повреждения (МЗУП) – глубина вмятины (h), возникшей при случайном ударном воздействии, при этом МЗУП должен гарантированно обнаруживаться при стандартных формах технического обслуживания ВС.

Результаты, приведенные в открытых публикациях, а также в отчетах по выполненным в ЦАГИ и ГосНИИГА проектам, позволили установить практический критерий порогового значения обнаруживаемости МЗУП на поверхности ВС из ПКМ ($h_{\text{порог}} = 0,25$ мм) в целом, подтвердить его надежность, а также позволили охарактеризовать влияние на визуальную обнаруживаемость эксплуатационных факторов [1]. Расчеты показали, что МЗУП основных силовых элементов конструкции ВС из ПКМ являются последствиями внешних воздействий с величинами энергии ≤ 30 Дж. Эти вычисления подтверждаются зарубежными статистическими данными.

Прочность авиаконструкции, имеющей МЗУП,

должна быть обеспечена расчетным путем с учетом действующих на конструкцию нагрузок. МЗУП не должны снижать прочность ниже расчетной нагрузки. Для обоснования соответствия конструкции ВС этому требованию необходимо определить порог визуальной контролепригодности, т.е. оценить параметры МЗУП.

В связи с этим, с одной стороны, весьма актуальна задача повышения эффективности визуально-оптического метода контроля путем создания и применения чувствительных к удару покрытий – ударочувствительных полимерных покрытий с оптическими свойствами (УИП) для экспресс-диагностики состояния авиационных конструкций из ПКМ для выявления трудно обнаруживаемых повреждений. УИП, нанесенные на поверхность элементов и агрегатов ВС из ПКМ, помогут быстро, надежно и с малыми затратами выявить механические повреждения и опасные зоны, а их количественную оценку выполнить позднее с использованием инструментальных методов неразрушающего контроля. С другой стороны, необходимо повысить точность, достоверность и информативность инструментальных методов контроля, например, ультразвукового (УЗК). Это позволит провести необходимый ремонт прежде, чем ситуация станет критической.

2. Основная часть

Авторами была разработана комплексная технология неразрушающего контроля для обнаружения и количественной оценки МЗУП элементов авиаконструкций из ПКМ, основанная на использовании разработанных УИП (рис. 1) и действующего макета лазерно-ультразвуковой измерительной системы (ЛУИС) (рис. 2), сочетающей в себе функции измерителя глубины вмятины и дефектоскопа. На сегодняшний день достигнут седьмой уровень готовности технологии (УГТ-7) [2].

Технология включает следующие этапы:

1) выявление с помощью УИП и ультрафиолетового освещения мест расположения МЗУП на поверхности планера ВС во время штатного визуального осмотра;

2) использование ЛУИС для количественной оценки параметров разрушений ПКМ в зонах МЗУП, обнаруженных на предыдущем этапе.

УИП позволяет увеличить вероятность обнаружения мест локализаций МЗУП на поверхности элементов авиаконструкций из ПКМ в диапазоне энергий ударов 20...25 Дж. Причем процедура нанесения УИП является стандартной (аналогична штатной окраске ВС), экономически эффективной и не



Рис. 1. Визуализация ударного повреждения углепластикового образца, окрашенного полиуретановой эмалью, с нанесенным УИП при обычном (а) и ультрафиолетовом (б) облучении



Рис. 2. Действующий макет ЛУИС

требует специальной квалификации обслуживающего персонала [3].

Известно, что прямой визуальный контроль композитных изделий принципиально не позволяет выявить внутренние несплошности, не выходящие на поверхность, истинный размер которых может в разы превышать видимые на поверхности следы. Поэтому для их качественной и количественной оценки используют различные инструментальные методы.

В разработанной технологии применяют программно-аппаратный комплекс ЛУИС, действующий макет которого является совместной разработкой прочнистов ЦАГИ и объединенного коллектива ИПЛИТ РАН и ИОФ РАН (руководитель – профессор А.А. Карабутов), финансируемой в рамках проекта РФФИ № 19-29-13019. Комплекс построен на основе российской элементной базы, алгоритмов и программного обеспечения.

В ЛУИС используется лазерно-ультразвуковой метод генерации зондирующего сигнала вместо электромеханического, применяемого в большинстве промышленных УЗК-дефектоскопов. Мертвая зона ЛУИС не превышает 0,05 мм (аналогичная характеристика обычных УЗК-дефектоскопов 0,7 мм), что дает возможность исследовать вмятины МЗУП. Разрешающая способность ЛУИС: по глубине составляет 0,1 мм, в плоскости $\geq 1,0$ мм. Программно-аппаратный комплекс позволяет как на тонкостенных (1...2 мм), так и на толстых (до 60 мм) композитных изделиях определять внешние и внутренние параметры МЗУП и зарегистрировать картину их

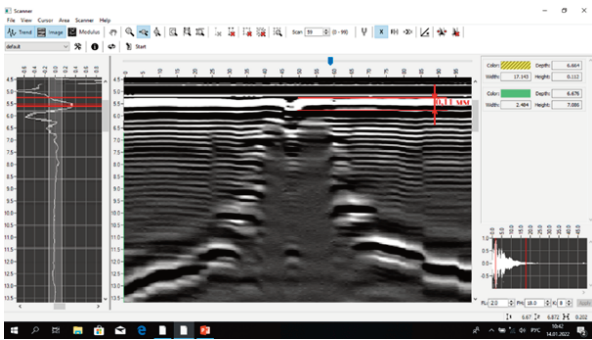


Рис. 3. Пример визуализации пирамиды ударного повреждения с помощью ЛУИС и оценки глубины вмятины в углепластике (0,11 мм)

рельефа (рис. 3).

ЛУИС дает возможность при ручном сканировании оценивать глубины расположения внешних и внутренних несплошностей в ПКМ с характеристикой их типа (вмятина, расслоение, избыток связующего и пр.), при использовании датчика пути определять протяженность несплошностей вдоль оси сканирования. Кроме того, ЛУИС позволяет зафиксировать подповерхностные несплошности, не обнаруживаемые при визуальном контроле из-за релаксации напряжений, в самом ПКМ или многослойном пакете с лакокрасочным покрытием (выравниватель, грунтовка, эмаль).

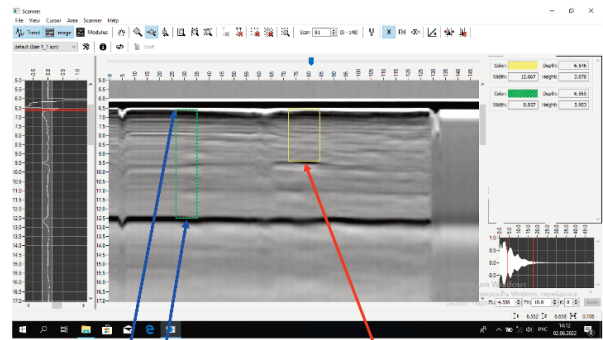
Контроль можно выполнять на плоских и квазиплоских композитных образцах и элементах конструкций ВС как в лабораторных/стендовых, так и в полевых/аэродромных условиях. ЛУИС обладает большим потенциалом для модернизации (дооснащения), например системой планшетного сканирования или роботизированным манипулятором, в этом случае можно будет получать не только развертки (сканы) типа А, В и D, но и развертки типа С – послойные карты несплошностей.

Принимая во внимание важность улучшения эксплуатационных характеристик композитных силовых элементов авиаконструкций, снижения трудоемкости и стоимости работ по их техническому обслуживанию и ремонту, а также с учетом опасности наличия дефектов и повреждений критических мест конструкций, была проведена отработка технологии на элементарных, конструктивно подобных образцах и элементах натуральных авиаконструкций из ПКМ (рис. 4 – рис. 7).

Разработанная комплексная технология позволит быстро и эффективно получать достоверные данные о техническом состоянии элементов авиаконструкций, облегчит техническую поддержку их летной годности и сократит время, затрачиваемое на техническое обслуживание и ремонт, в результате будет способ-



Рис. 4. Металлокомпозитные валы двигателей



Верх и дно композитной части Несплошность (расслоение)

Рис. 5. Пример визуализации внутренней несплошности в композитной части вала



Рис. 6. Образец, вырезанный из регулярной части малогабаритной лопасти тянущего винта из углепластика с пенопластовым наполнителем и подкрепляющим элементом (лонжероном)

ствовать повышению безопасности эксплуатации авиаконструкций из ПКМ.

3. Заключение

Выполненные эксперименты подтверждают большой потенциал локализации и количественной оценки поверхностных и внутренних несплошностей у различных машиностроительных изделий из ПКМ, что возможно с применением разработанной в ЦАГИ

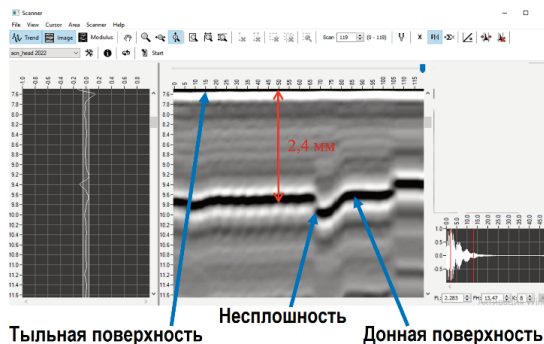


Рис. 7. Пример визуализации внутренней несплошности – технологического дефекта в виде непрочлея (сканирование вдоль лонжерона)

комплексной технологии.

Список использованных источников

[1] Дубинский С.В., Фейгенбаум Ю.М., Сенюк В.Я. Определение критериев прочности по условиям визуальной контролепригодности ударных

повреждений в композитных авиационных конструкциях // Научный Вестник МГТУ ГА. 2019. Т. 22, № 6. С. 86–99.

[2] Технология обнаружения малозаметных ударных повреждений силовых элементов авиационных конструкций из армированных ПКМ с использованием ударочувствительных полимерных покрытий с оптическими свойствами С.Л. Чернышев, М.Ч. Зиченков, С.А. Смотров, В.М. Новоторцев, А.М. Музафаров. // Конструкции из композиционных материалов. 2018. № 4 (152). С. 48–53.

[3] С.А. Смотров. Отработка технологии обнаружения малозаметных ударных повреждений с помощью чувствительного к ударам индикаторного покрытия на конструкции летательного аппарата из полимерных композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов. 2021. № 2 (162). С. 14–19.