УДК 620.179.13

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ УДАРНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2020 г. С.Л. Чернышев¹, М.Ч. Зиченков¹, В.И. Голован¹, А.М. Зайцев¹, Е.А. Казьмин¹, И.Е. Ковалев¹, А.Б. Корнилов^{1,*}, Г.А. Корнилов¹, А.В. Смотров¹, А.А. Чернявский¹, А.О. Шустров¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского», Россия 140180 Московская обл., г. Жуковский, 1 ^{*}E-mail: andrey.kornilov@tsagi.ru

> Поступила в редакцию 16.03.2020; после доработки 30.06.2020 Принята к публикации 29.07.2020

Широкое внедрение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в авиационную технику обусловило поиск и выбор эффективных методов неразрушающего контроля элементов конструкции летательного аппарата (ЛА). Согласно данным эксплуатации, одним из основных типов случайных повреждений авиационной техники являются ударные воздействия. Поэтому обнаружение таких повреждений на изделиях из ПКМ с использованием теплового неразрушающего контроля как перспективного метода и выявление особенностей данного подхода являются актуальными. В настоящей работе авторами проведены испытания на стандартных образцах материалов, конструктивно-подобных образцах (КПО) и элементах натурной авиационной конструкции. Результаты тепловизионных съемок ударных повреждений изделий из ПКМ проанализированы после испытаний с использованием штатного и специализированного программного обеспечения. Сформулированы предложения, которые рекомендованы для дальнейших исследований и практического использования.

Ключевые слова: активный тепловой контроль, дефект, ударное повреждение, источник теплового нагружения, полимерные композиционные материалы, стандартный образец, конструктивно-подобный образец, натурный элемент конструкции, термограмма, термопрофилограмма, температурный сигнал, лакокрасочное покрытие, молниезащитная сетка.

DOI: 10.31857/S0130308220090031

введение

Среди случайных повреждений обшивки планера в процессе эксплуатации ЛА наиболее часто встречающимися являются ударные повреждения [1, 2], поэтому их дефектоскопии и дефектометрии уделяется наибольшее внимание при проведении неразрушающего контроля и разработке методов его реализации. Одним из подходов, получившим широкое использование, является метод активного теплового неразрушающего контроля (ATHK) [3, 4].

Актуальность задачи АТНК обусловлена широким внедрением ПКМ в авиационные конструкции и необходимостью повышения эффективности средств обнаружения повреждений в условиях производства и эксплуатации ЛА, поскольку широко применяемые методы неразрушающего контроля имеют серьезные недостатки, в частности, существенное ограничение размеров контролируемой зоны, необходимость использования высококвалифицированного персонала с опытом работы, значительный рост стоимости оборудования и трудоемкости при дефектоскопии крупноразмерных деталей [4, 5].

Исследования по отработке и оптимизации процедур АТНК для контроля композитных конструкций осуществлялись как отечественными [6—10], так и зарубежными специалистами [11— 16]. Во всех публикациях, посвященных итогам этих работ, было показано преимущество использования инфракрасной термографии при проведении контроля.

Однако результаты исследований, связанных с обнаружением ударных повреждений, представлены в ограниченном объеме публикаций. Так, в работе [6] рассмотрена оценка серьезности ударных повреждений, выполненных на образцах из углепластика, в частности, показана возможность использования в качестве критерия серьезности дефекта коэффициентов температуропроводности и тепловой инерции. В работе [7] показано, что первичная количественная оценка поврежденности, направленная на дальнейшую оценку прочности материала или жизненного цикла, может быть сделана на основе определения тепловых свойств дефекта материала с формированием термоизображений температуропроводности в двухсторонней процедуре и тепловой инерции в односторонней процедуре. В работе [11] исследованы ударные повреждения на различных типах композитов с термопластичными и термореактивными матрицами с разными видами и ориентацией армирующих волокон и показана возможность обнаруживать расслоение материала, вызванное ударным воздействием, на ранней стадии эксплуатации для принятия профилактических мер. В работе [12] проводилось термографическое обследование ударных повреждений, нанесенных на различные типы образцов из ПКМ с низкой энергией удара 2—19 Дж, поскольку при эксплуатации ЛА главную опасность представляют визуально невидимые ударные воздействия, приводящие к расслоению материала. При этом акцент был сосредоточен на определении местоположения дефекта и эволюции его «горячих» точек в разных типах материалов с разной ориентацией армирующих волокон с возможностью формирования карты повреждения в плоскости и по глубине.

В этих работах были показаны возможности АТНК при исследовании ударных повреждений ПКМ, поскольку результаты представляют полезную информацию как для идентификации возникновения и распространения ударного повреждения, так и для его обнаружения. Однако характерной особенностью этих исследований является то обстоятельство, что они за редким исключением проводились на элементарных образцах материалов. К тому же при проведении этих исследований, во-первых, не учитывался масштабный эффект, присущий композиционным материалам, а, во-вторых, не рассматривалось наличие лакокрасочных покрытий (ЛКП) и других защитных средств, требуемых по условиям эксплуатации авиационной техники. В связи с этим полученные результаты представляют определенный научный интерес, но не позволяют осуществить их практическое внедрение.

Целью настоящей работы является создание научно-технического задела, на основе которого возможна разработка простого в исполнении, но наглядного в представлении результатов измерения прикладного метода АТНК операторского уровня, что существенно снизит трудоемкость контроля при отсутствии необходимости высокой квалификации операторов при производстве и эксплуатации авиационной техники.

В связи с этим в качестве исследуемых объектов были использованы не только стандартные образцы материалов, но и конструктивно-подобные образцы, а также натурные элементы конструкций ЛА из ПКМ. При этом контролируемые объекты были как с ЛКП, так и без него, с наличием молниезащитной сетки (M3C) и без нее. Также были проведены исследования сэндвич-панели из углепластика с сотовым заполнением. Очевидно, что при таком многогранном подходе к испытаниям образцов можно создать методологию применения АТНК для исследования ударных повреждений авиационных конструкций из ПКМ в натурных условиях.

Источником теплового нагружения (ИТН) являлся комплект из 5 ламп накаливания ИКЗ-500, расположенных по углам и в центре квадрата конструкции облучателя, а измерительным средством — тепловизор FLIR SC7700M. Время нагрева образцов варьировалось от 3 до 30 с, время охлаждения — 30—60 с. Для обработки полученной информации авторами использовано не только штатное программное обеспечение тепловизора [17], но и дополнительные специализированные программные средства [18].

В роли показателя обнаруживаемости (видимости) ударного повреждения в настоящей работе был принят температурный сигнал как разность значений температуры дефектной и бездефектной областей термограммы, формируемой тепловизором [4, 19—22].

1. АТНК ОБРАЗЦОВ МАТЕРИАЛОВ

Для этих испытаний были подготовлены стандартные образцы материалов — пластины из стеклопластика и углепластика с нормированными ударными повреждениями с энергией удара W = 10-50 Дж. Указанные образцы имели толщину 4—6 мм. Это связано с тем, что ПКМ малой толщины в основном применяют в авиационных конструкциях в качестве оболочки (обшивки), причем, как правило, с внутренним конструктивным подкреплением, изменяющим восприятие материалом ударного воздействия.

Первоначально эксперименты были проведены на образцах материалов, не имеющих на поверхности ЛКП, поскольку результаты этих испытаний стали не только основой для понимания физических процессов обнаружения ударных повреждений рассматриваемого типа на ПКМ без ЛКП, но и в дальнейшем были использованы для оценки влияния ЛКП на выявление аналогичных дефектов. Анализ этих данных позволил выработать рекомендации по практическому применению АТНК.

При применении одностороннего метода теплового контроля материала, когда источник теплового нагружения и тепловизор находились с одной его стороны, было установлено, что ударные повреждения на термограмме образца стеклопластика уверенно проявлялись уже на начальной стадии нагрева при включенном ИТН (рис. 1*a*). Изображение дефекта приобретало положительный температурный сигнал, который, как показал дальнейший анализ, имел значительную случайную составляющую за счет бликов отраженного излучения в зависимости от взаимного расположения источника теплового нагружения и тепловизора. Это также обусловлено тем, что



Рис. 1. Термограммы ударных повреждений элементарных образцов материалов (*W* = 20 Дж): *а* — стеклопластик; *б* — углепластик, при включенном источнике теплового нагружения.

отраженное излучение ИТН от деформированной в результате удара поверхности стеклопластика зависит не только от геометрии поверхности повреждения, но и от присущих стеклопластику отражательных свойств направленного характера.

Случайность характера температурного сигнала подтверждается формой так называемых термопрофилограмм, проходящих через дефект в различных направлениях (см. рис. 1*a*). Например, термопрофилограмма в направлении 2 в отличие от направления *I* проходит через ярко выраженные оптические блики, приводящие к значительному температурному сигналу. В то же время на стадии охлаждения образца стеклопластика после нагрева, происходящего при отключении ИТН с перекрытием его потока излучения, температурный сигнал дефекта становился стабильно отрицательным (рис. 2*a*). Это связано как с исчезновением отраженного излучения источника теплового нагружения, так и с рядом других феноменов, включая частичную прозрачность стеклопластика, изменение локального теплового сопротивления и возможную инверсию сигнала в центре ударного повреждения стеклопластика. Величина температурного сигнала при этом составляла $\Delta t \approx -0,5$ °C, что вполне достаточно для уверенного обнаружения повреждений тепловизором.



Рис. 2. Термограммы ударных повреждений элементарных образцов материалов (*W* = 20 Дж): *а* — стеклопластик; *б* — углепластик, на стадии охлаждения после нагрева при выключенном источнике теплового нагружения.

На образцах углепластика без ЛКП в отличие от стеклопластика, как показали испытания, ударные повреждения при включенном ИТН практически не были обнаружены из-за сильного влияния диффузно-отраженного излучения от оптически неоднородной поверхности переплетающихся волокон и связующего вещества образца (рис.16). Однако они уверенно диагностированы на стадии охлаждения образца после нагрева при отключенном ИТН и перекрытии потока излучения (рис. 26). При этом температурный сигнал дефекта был положительным, что объясняется увеличением локального теплового сопротивления углепластика в области дефекта по сравнению с бездефектной областью. Величина температурного сигнала составляла $\Delta t = 1,5 - 2,0$ °C.

На следующем этапе было исследовано влияние ЛКП на величину температурного сигнала ударного повреждения образца углепластика. Актуальность задачи связана с тем, что реальные авиационные конструкции из эксплуатационных соображений всегда покрываются ЛКП, что в силу их оптических свойств существенно меняет поле яркости излучения поверхности образца в ИК-диапазоне длин волн, фиксируемое тепловизором.

В этой серии экспериментов были проведены испытания образцов углепластика с ЛКП как при включенном, так и выключенном после нагрева ИТН, поскольку выше было показано, что дефект в углепластике без ЛКП не обнаруживался при нагреве и уверенно диагностировался при охлаждении. Подтверждающим фактором режима работы ИТН по термограммам выступала яркость бумажных стикеров, расположенных левее от двух ударных повреждений с энергией удара W = 10 и 20 Дж. Видно, что их яркость имела существенно большую величину за счет отраженного излучения включенного ИТН (рис. 3*a*) и уменьшалась при выключении ИТН (рис. 3*б*).



Рис. 3. Термограммы и термопрофилограммы двух ударных повреждений углепластика с ЛКП: *а* — термограмма при включенном ИТН; *б* — термограмма при выключенном ИТН; *в* — термопрофилограммы.

Полученные результаты теплового контроля образцов углепластика с ЛКП приведены на рис. 3, где показаны их термограммы при включенном (*a*) и выключенном (*б*) ИТН. Видно, что наличие ЛКП кардинально меняет процедуру обнаружения дефекта, поскольку в этом случае температурный сигнал дефекта стабильно проявляется как при нагреве, так и при охлаждении образца. При этом термопрофилограммы в области дефекта имели ярко выраженные максимумы, температурный сигнал каждого дефекта был примерно одинаков в конце нагрева и начале охлаждения, а значения температуры образца при включенном ИТН были на ~5°С выше, чем при выключенном (рис. 3*в*).

Динамика изменения температурного сигнала ударных повреждений различных образцов на стадиях нагрева и охлаждения после экранирования ИТН (рис. 4) показывает, что для стеклопластика и углепластика без ЛКП характерно ступенчатое изменение температурного сигнала при включении и выключении источника теплового нагружения, зависящее от величины отраженного излучения.

В то же время для образца углепластика с ЛКП установлено плавное увеличение температурного сигнала при нагреве и плавное уменьшение при охлаждении. Можно предположить, что у стеклопластика при наличии ЛКП температурный сигнал дефекта будет также плавно изменяться при включении и выключении ИТН (как у образца углепластика с ЛКП). Следовательно, наличие ЛКП на поверхности ПКМ принципиально влияет на картину полей яркости поверхности исследуемого образца и, соответственно, на процедуру активного теплового контроля.

Для образца углепластика с ЛКП были также проведены испытания по оценке температурного сигнала нормированных повреждений, нанесенных с различной энергией в диапазоне W = 10-50 Дж. На рис. 5*a* приведена термопрофилограмма поврежденного образца при одностороннем методе теплового контроля материала, т.е. при нагреве спереди. Все ударные по-



Рис. 4. Динамика изменения температурного сигнала ударных повреждений образцов при нагреве и охлаждении.

вреждения были уверенно идентифицированы на термограмме. При этом температурный сигнал дефектов являлся положительным и составлял $\Delta t = 26-28$ °C для дефекта Д1 (50 Дж), $\Delta t = 10-12$ °C для дефекта Д2 (20 Дж) и $\Delta t = 2,0-2,5$ °C для дефекта Д3 (10 Дж). Следует также отметить, что форма термопрофилограмм дефектов различная в зависимости от значения энергии удара. Так, при энергии удара W = 50 и 20 Дж форма профиля в области дефекта Д3 — «кратерообразной» («М» – профиль). Очевидно, что при дальнейшем уменьшении энергии удара форма профиля дефекта будет приобретать еще более размытые очертания, что затруднит его выявление. В этом случае для обнаружения дефекта потребуется либо использование ИТН с другим принципом работы, либо применение специальных методов обработки цифровых изображений.

Для образца углепластика с ЛКП был апробирован также случай двухстороннего теплового контроля, когда источник теплового нагружения и тепловизор находились по разные стороны образца (рис. 56).



Рис. 5. Термопрофилограммы ударных повреждений углепластика с ЛКП при различных методах теплового контроля: *a* — односторонний метод; *б* — двухсторонний метод.

С практической точки зрения обнаружения ударных повреждений данный случай малоприменим при эксплуатации ЛА, но его сравнение с односторонним тепловым контролем позволило расширить понимание физических процессов обнаружения дефектов. Как показали результаты экспериментов, при двухстороннем контроле термопрофилограмма по отношению к профилю одностороннего контроля имела «обратный» характер (см. рис. 5a, δ). При этом локальные температурные минимумы при нагреве сзади соответствовали локальным максимумам при нагреве спереди, но с несколько меньшим температурным сигналом дефектов.

Таким образом, проведенные испытания по тепловому контролю на образцах стеклопластика и углепластика позволили выявить следующее:

ударные повреждения на различных типах ПКМ без ЛКП диагностированы не одинаково: так в случае углепластика в отличие от стеклопластика дефекты выявлены только после выключения источника теплового нагружения, т.е. при охлаждении образца с перекрытием облучателя;

материалам без ЛКП характерно ступенчатое изменение температурного сигнала при включении и выключении источника теплового нагружения;

наличие ЛКП принципиально влияло на температурный сигнал дефектов, в частности, температурный сигнал дефекта плавно нарастал при нагреве и плавно уменьшался при охлаждении;

ударные повреждения образцов материалов толщиной 4—6 мм были уверенно обнаружены при энергии удара выше 10 Дж, для локализации более слабых ударов потребуются иные подходы теплового контроля и обработки термоизображений;

для одностороннего и двухстороннего методов теплового контроля характерны «обратные» термопрофилограммы ударных повреждений.

2. АТНК КОНСТРУКТИВНО-ПОДОБНЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ ПКМ

Рассмотрение теплового неразрушающего контроля изделий из ПКМ на примере КПО является важной задачей при отработке методов АТНК натурных конструкций из ПКМ. Это связано с тем, что полученные результаты теплового контроля на плоских образцах материалов не могут быть автоматически перенесены в рекомендации по неразрушающему контролю композитных авиационных конструкций, а исследование реальных изделий очевидно существенно повышает трудоемкость и стоимость испытаний.

Создание перечня КПО из ПКМ является сложной проблемой, поскольку охватывает широкий круг материаловедческих, технологических, конструкторских и метрологических факторов. По-видимому, номенклатуру их нужно будет формировать и уточнять в процессе выполнения испытаний с предварительным теоретическим обоснованием конфигурации КПО и технологии их изготовления.

Рассмотрение АТНК конструктивно-подобных образцов из ПКМ было проведено на примере панелей из углепластика с тремя стрингерами и сэндвич-панели из углепластика с сотами, как типовых представителей КПО.

Панель из углепластика с тремя стрингерами. Отнесение данного образца к КПО обусловлено тем, что он состоит из того же материала, что и плоский образец, но с измененной структурой — подкреплением, обусловленной технологией изготовления для придания прочностных характеристик конструкции с учетом функционального назначения, а также с разнообразной геометрией отдельных частей, отличающихся по прочностным свойствам относительно друг друга. При этом характерной особенностью рассматриваемых ниже панелей из углепластика являлось наличие одного внешнего слоя из стеклопластика и слоя ЛКП, причем с разными направленными отражательными свойствами, поскольку, как указывалось выше на примере плоских образцов, наличие ЛКП в определенной мере способствует обнаружению повреждений.

Для этого были испытаны две трехстрингерные углепластиковые панели с толщиной обшивки ~4 мм. При этом поверхность панели № 1 имела зеркально-диффузное ЛКП, с разными составляющими отражения, а поверхность панели № 2 была окрашена двумя ЛКП, причем правая ее половина матовым ЛКП, т.е. дифффузным, а левая — глянцевым (зеркальным) ЛКП.

Испытуемые панели отличались геометрией и энергией нанесения ударов, так на панели № 1 удары с энергией 2,5; 5; 7,5; 10; 15 и 20 Дж наносились по линии стрингеров, а на панели № 2 удары с энергией 5; 15; 25 и 20 Дж нанесены по обшивке между стрингерами как на матовой (левая часть), так и на глянцевой (правая часть) поверхностях панели соответственно.

При нагреве панели № 1 источником теплового нагружения с использованием метода отраженного теплового излучения были зарегистрированы, как показал анализ термограммы, только области ударных повреждений с энергией удара 10, 15 и 20 Дж. При этом температурный сигнал дефектов являлся случайным: как положительным, так и отрицательным в зависимости от мощности ИТН и углов облучения и наблюдения из-за зеркально-диффузного характера ЛКП и составлял $|\Delta t| \le 20$ °C. Причем максимальные значения Δt получены при зеркальных углах облучения ИТН и наблюдения тепловизором.

На рис. 6*a*, δ соответственно представлены увеличенная термограмма одного из повреждений Д5 с энергией удара 15 Дж и три термопрофилограммы, причем две из них (*1* и 2) проходят через указанный дефект, а третья (3) через бездефектную зону вблизи данного повреждения. Видно, что одна часть данного дефекта в районе Pix = 200 на термограмме затенена и имела температуру (профиль *1*) меньше температуры окружающего фона (профиль *3*), а другая часть дефекта имела боль-



Рис. 6. Термограмма и термопрофилограммы панели №1 в области ударного повреждения Д5: *а* — увеличенная термограмма повреждения Д5 с линиями термопрофилограмм; *б* — термопрофилограммы через дефект (*1*, *2*) и вблизи дефекта (*3*).

шую температуру (в районе пересечения профилей *l* и *2*) за счет зеркального блика. В левой части термограммы зафиксирован обширный зеркальный блик — пятно от облучающего ИТН (профиль *3*). При этом в зоне дефектов отмечен достаточно равномерный прогрев поверхности образца.

В процессе испытаний была также исследована возможность обнаружения ударных повреждений лицевой поверхности по линии стрингера на стадии охлаждения. В результате в рамках одностороннего метода было выявлено, что после нагрева спереди до 46 °C и при последующем охлаждении обнаруживаются дефекты Д4, Д5 и Д6 с энергией удара W = 10, 15 и 20 Дж соответственно, как и в случае нагрева. Однако следует отметить, что при этом имели место разные физические процессы, так в первом случае обнаружение происходило с использованием метода отраженного теплового излучения, а во втором — за счет нагрева и различия теплопроводности дефекта и бездефектной области.

Одним из путей повышения эффективности обнаружения дефектов, как известно, является цифровая обработка термоизображений после испытаний с использованием специального программного обеспечения [1, 3]. Проведенная дополнительная обработка экспериментальных данных термографирования панели № 1 с применением преобразования Фурье позволила обнаружить еще два дефекта (Д2 и Д3) с энергией удара 5 и 7,5 Дж (рис. 7*a*, *б*). Трудность обнаружения слабых ударных повреждений, нанесенных по линии стрингера, объясняется малым расслоением углепластика в зоне удара и соответственно недостаточным для чувствительности тепловизора изменением теплопроводности дефекта по сравнению с бездефектной областью.



Рис. 7. Термограмма (*a*) и термопрофилограмма (*б*) панели № 1 с ударными повреждениями на стадии охлаждения по результатам дополнительной обработки программными средствами.

Проведенный эксперимент АТНК панели № 2 с различными ЛКП позволил выявить влияние характера их отражательных характеристик на температурный сигнал зон ударных повреждений. Следует отметить, что в обоих случаях, как для матового, так и для глянцевого ЛКП, повреждения были выявлены только с энергией удара 20 и 25 Дж.

При этом используемый подход позволил получить динамику температурного сигнала ударных повреждений панели № 2 на стадии охлаждения после выключения ИТН, а также зафиксировать термограммы и термопрофилограммы для любого момента времени.

Так, через ~1 с после отключения ИТН (рис. 8) было установлено, что дефекты Д1 и Д2 (кривые 1, 2) с энергией удара 25 и 20 Дж на матовом ЛКП нагреты достаточно равномерно по периметру вмятины из-за диффузности свойств покрытия и выглядели на термограмме в виде однородного «кольца», а дефекты Д3 и Д4 (кривые 3, 4) с энергией удара 25 и 20 Дж на глянцевом ЛКП имели вид ярких точек в отдельных местах вмятин из-за их зеркальных свойств (см. рис. 8). При этом температурный сигнал дефектов от ударов 25 и 20 Дж на глянцевой поверхности (кривые 3, 4) существенно больше, чем от ударов энергией 25 и 20 Дж на матовой поверхности (кривые 1, 2) (см. рис. 8). Анализ показал, что это связано с различным характером поглощения энергии дефектами в процессе нагрева при включенном ИТН.



Рис. 8. Термопрофилограммы дефектов на матовом (1, 2) и глянцевом (3, 4) ЛКП при охлаждении панели № 2 после нагрева.

Таким образом, было установлено, что данный класс КПО в виде трехстрингерных панелей из углепластика толщиной 4 мм с ударными повреждениями $W \ge 15$ Дж поддается достаточно надежной дефектоскопии методом АТНК, при этом, по-видимому, потребуется определенная доработка исследовательского аппарата для выявления повреждений с малой энергией W < 15 Дж.

Сэндвич-панель из углепластика с сотами. На рис. 9*a* приведен внешний вид сэндвич-панели из углепластика с сотовым заполнением с ударными повреждениями: толщина панели — 11 мм, толщина обшивки — 1 мм. Следует отметить, что данный образец отнесен к КПО, поскольку основным его элементом, воспринимающий удар, является обшивка — внешняя поверхность конструкции сэндвич-панели, на которой ударные повреждения в определенной мере амортизируются внутренней структурой. При этом данный образец можно отнести как к КПО, так и к частям натурных авиационных изделий из ПКМ, поскольку он напрямую используется в конструкции летательных аппаратов.

Для испытаний была использована сэндвич-панель с ударными повреждениями: Д1 с энергией удара W = 4 Дж и Д3 с W = 10 Дж. Дефект Д2, визуально незаметный на поверхности, получен при ударе W = 4 Дж с амортизирующей подкладкой под образец.

При нагреве с лицевой стороны (спереди) во время «подсветки» данного КПО очень хорошо наблюдался дефект Д3 за счет зеркально отраженного блика, температурный сигнал которого составлял > 20 °C. Дефект Д1 не создал зеркального блика в направлении тепловизора и его температурный сигнал составил ~4 °C. Дефект Д2 с малым ударным повреждением при АТНК спереди не зарегистрирован. На стадии охлаждения после нагрева спереди обнаруживались дефекты Д1 и Д3 за счет различий нагрева области дефекта и бездефектных областей. Дефект Д2 при этом также не был обнаружен. Следовательно при одностороннем методе теплового контроля с использованием стандартных ИТН не удалось локализовать слабое ударное повреждение Д2.



Рис. 9. Сэндвич-панель из углепластика с сотами: *а* — образец с ударными повреждениями; *б* — термопрофилограмма.

В связи с этим был апробирован контактный нагрев образца по принципу «теплого одеяла», когда на исследуемую область конструкции в течение 3-10 с накладывалось нагретое до 50-70 °C тело, плотно прилегаемое к его поверхности, что позволило достаточно быстро прогреть объект испытаний. В этом случае, как показали результаты обработки тепловизионной съемки, оказалось возможным решить поставленную задачу обнаружения слабого дефекта. Следует отметить, что, хотя дефект Д2 визуально незаметен, так как удар W = 4 Дж производился на амортизирующей подкладке, он был отчетливо диагностирован по результатам анализа термограммы и термопрофилограммы (см. рис. 96) при данном виде нагрева.

Таким образом, при нагреве контактным способом поверхности сэндвич-панели в течение ~3 с с помощью теплого предмета со стороны нанесения ударных повреждений были уверенно обнаружены все 3 дефекта с возможностью определения их размеров и структуры.

При двухстороннем тепловом контроле при облучении сэндвич-панели с обратной стороны (сзади), как показали испытания, были уверенно обнаружены все три ударных повреждения Д1, Д2 и Д3, а также элементы внутренней структуры, подлежащие дополнительному исследованию. Температурный сигнал дефектов при температуре лицевой поверхности 22—23 °C составил $\Delta t_1 = 0.5$ °C; $\Delta t_2 = 0.6$ —1,0 °C и $\Delta t_3 = 1$ —2 °C. При этом следует отметить, что дефект Д2, визуально наблюдаемый как слабо заметный по сравнению с Д1, имел больший температурный сигнал, очевидно, из-за более значительных внутренних повреждений сотового заполнителя.

Таким образом, в результате проведенных испытаний КПО из ПКМ было выявлено следующее:

1) метод АТНК применим к рассмотренному перечню образцов из ПКМ с некоторыми особенностями при обнаружении ударных повреждений:

для трехстрингерных панелей из углепластика толщиной 4 мм характерна сравнимая эффективность обнаружения дефектов при одностороннем контроле как при нагреве, так и при охлаждении образцов, причем в значительной мере зависящая от наличия ЛКП. Повышение результативности теплового контроля для данного типа КПО возможно после испытаний при математической обработке результатов тепловизионной съемки, в частности, за счет использования преобразования Фурье, что позволило обнаружить ударные повреждения с энергией W = 5,0-7,5 Дж;

для сэндвич-панелей из углепластика с сотами с толщиной обшивки ~1 мм установлена возможность обнаружения ударных повреждений с энергией W = 4 - 10 Дж; для повышения эффективности обнаружения потребуется применение иного источника теплового нагружения, возможно, на основе контактного принципа нагрева;

2) учитывая существующее многообразие конструктивных решений выполнения изделий из ПКМ, необходимо разработать методологию создания КПО, в том числе настроечных образцов, и расширить их номенклатуру для проведения испытаний.

3. АТНК НАТУРНЫХ АВИАЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПКМ

Апробация процедуры АТНК применительно к натурным элементам конструкции перспективного гражданского самолета была выполнена на нижней панели внешнего композитного закрылка, подверженного различным нормированным ударным воздействиям в разных зонах его поверхности. Характерным отличием данной конструкции от испытанных прежде являлось наличие молниезащитной сетки с «жертвенным слоем» на поверхности ПКМ. В настоящей работе представлены результаты исследования только двух дефектов — № 5 и № 6. Так, особенностью дефекта № 5 являлось то, что он представлял собой ударное повреждение, нанесенное с энергией удара

W = 15 Дж на внешнюю обшивку толщиной 1,4 мм над внутренними сотами, глубина вмятины составила 2,4 мм. В то же время ударное повреждение № 6 с большей энергией удара (W = 50 Дж), нанесенное на внешнюю обшивку толщиной 4,2 мм, имело вмятину глубиной только 1,14 мм.

При облучении панели внешнего композитного закрылка лампами ИТН имели место мощные «блики» отраженного излучения от заклепок ($T_s > 80$ °C), а ударный дефект Д5 очень хорошо диагностировался методом отраженного теплового излучения на фоне ИК изображения лампы. Температурный сигнал дефекта на фоне отраженного излучения лампы был отрицательным и составлял $\Delta t \approx -16 - -14$ °C.

При испытаниях на примере плоских образцов и КПО из ПКМ было установлено, что в общем случае ИК подсветка дефекта является случайным событием, зависящим от взаимного расположения дефекта и ИТН по отношению к тепловизору, что приводит к необходимости использования вероятностных оценок температурного сигнала дефекта и возможности его обнаружения.

При выключении ИТН, как показали испытания, наблюдалось достаточно протяженное тепловое поле ударного повреждения Д5. При этом подсветки от ламп уже не было, о чем свидетельствовали «холодные» заклепки, а дефект выглядел в виде вытянутой «гряды» с провалом в центре (рис. 10*a*). Температурный сигнал различных участков ударного повреждения составлял $\Delta t = -1, 4... -1, 0$ °C (рис. 10*b*).



Рис. 10. Термограмма и термопрофилограммы ударного повреждения Д5 на панели внешнего композитного закрылка при выключении ИТН:

а — увеличенная термограмма в области дефекта Д5; б — термопрофилограммы в области дефекта Д5.

Зона дефекта достаточно быстро охлаждалась за счет наличия высокотеплопроводной молниезащитной сетки. Анализ процесса развития термограммы и термопрофилограммы дефекта № 5 после выключения ИТН в течение 10 с показал, что:

a) вначале имело место возникновение яркого отраженного блика (остаточного), который исчез на последующих кадрах, а зона нагрева области дефекта выглядела как узкий протяженный лепесток, который исчез через ~3 с;

б) в дальнейшем дефект имел вид небольшой «холодной» области с отрицательным температурным сигналом.

Выявленные особенности объясняются, по-видимому, тем, что металлическая молниезащитная сетка играет роль экрана и радиатора, уменьшающего и сглаживающего температурный сигнал дефекта при нагреве и охлаждении.

Другое ударное повреждение № 6 (W = 50 Дж) с глубиной вмятины 1,14 мм при АТНК на этапе охлаждения после выключения ламп ИТН очень уверенно и стабильно было диагностировано как «теплая» область. Температурный сигнал дефекта № 6 в начале охлаждения составлял $\Delta t \approx 2$ °С и уменьшился до 0,7 °С через 12 с (300 кадров). Кроме того, в процессе анализа термограммы панели закрылка в области дефекта № 6 была дополнительно выявлена внутренняя область с измененной структурой. Вероятно, это является расслоением сот и общивки, что требует дальнейшей проверки.

Таким образом, в процессе исследований АТНК с целью обнаружения дефектов на натурных конструкциях было установлено, что повреждения внешней обшивки, имеющие видимое нарушение структуры поверхности типа «вмятина» или «трещина» могут быть обнаружены методом отраженного теплового излучения при подсветке дефекта даже маломощным источником (на стадии нагрева образца). При выключении нагрева на стадии охлаждения образца характери-

стики обнаружения дефектов многообразны в зависимости от параметров повреждений и места их нахождения на обшивке. Некоторые дефекты хорошо «нагреваются» за счет возникшего расслоения материала в зоне удара и сохраняют определенное время свой температурный сигнал, необходимый для обнаружения, другие дефекты «не нагреваются» и не создают температурного сигнала, в частности, из-за уравнивающей теплопроводности молниезащитной сетки, что требует проведения дополнительных исследований с использованием мощного ИТН с высокой равномерностью облучения.

выводы

Активный тепловой неразрушающий контроль ударных повреждений конструкций из ПКМ является достаточно результативным методом, что подтвердилось комплексными испытаниями на стандартных образцах материалов, конструктивно подобных образцах и натурных элементах авиационной техники. Выявлено существенное влияние лакокрасочных покрытий на поверхности ПКМ и наличия молниезащитной сетки на процесс обнаружения ударных повреждений.

В дальнейшем для повышения эффективности АТНК ударных повреждений конструкций из ПКМ необходимо:

отработать методологию формирования КПО из ПКМ, что позволит расширить их перечень и при испытании которых сформируется понимание особенностей обнаружения различных ударных повреждений;

расширить при испытаниях типаж источников теплового нагружения, включая контактный способ нагрева, и определить приоритетный источник для обнаружения дефектов и повреждений различной природы на натурных авиационных конструкциях из ПКМ;

разработать прикладную программу операторского уровня, поскольку имеющееся научное программное обеспечение сложно в эксплуатации, трудоемко в обслуживании и требует высокой квалификации операторов.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ №19-29-13008.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фейгенбаум Ю.М., Дубинский С.В. Влияние случайных эксплуатационных повреж-дений на прочность и ресурс конструкции воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. № 187. 2013. С. 83—91.

2. Breuer U.P. Commercial Aircraft Composite Technology. Chap. 2. Requirements, Development. and Certification Process. Switzerland: Springer International Publishing, 2016. P. 25–42.

3. *Maldague X.P.V., Jones T.S., Kaplan H., Marinetti S., Prystay M.* Chapter 2: Fundamentals of Infrared and Thermal Testing: Part 1. Principles of Infrared and Thermal Testing / Nondestructive Handbook, Infrared and Thermal Testing. V. 3. X. Maldague technical ed., P.O. Moore ed., 3rd edition. USA, Columbus, Ohio, ASNT Press, 2001. 718 p.

4. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль: М.: Изд-во Спектр, 2013. 542 с.

5. A technology goes mobile. Upside down: Robot for inspection and repairs. [Электронный ресурс] URL: https://www.lufthansa-technik.com/en/caire-repair-robot (дата обращения: 18.07.2020).

6. Vavilov V.P., Chulkov A.O., Derusova D.A. Evaluating Severity of Impact Damage in CFRP by Determining Thermal Effusivity and Diffusivity // WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer. 2014. V. 9. Is. 1. P. 251—260.

7. Vavilov V., Chulkov A., Smotrov A., Smotrova S., Moskovchenko A. Characterizing impact damage in GFRP/CFRP composites by determining thermal effusivity/diffusivity // Measurement Science and Technology. 2019. V. 30. 034003. 11 p. https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab018e

8. Кульков А.А., Будадин О.Н., Козельская С.О. Тепловой метод и средства диагностики надежности конструкций из композитных материалов в процессе силового нагружения по анализу динамических температурных полей / Труды 2-й Международной конференции «Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций» (Deformation and Failure of Composite Materials and Structures, DFCMS-2016), Москва, 18-20 октября 2016 г. М.: Столица, ИМАШ РАН, 2016. С. 69—70.

9. Сясько В.А. Возможности применения методов активной термографии для оперативного неразрушающего контроля высокотехнологичных композиционных и металлических изделий в процессе их изготовления и эксплуатации / Сборник трудов 2-й Международной научно-технической конференции «Приборы и методы неразрушающего контроля качества изделий и конструкций из композиционных и неоднородных материалов» (НККМ-2016), Санкт-Петербург, 7—9 декабря 2016 г. СПб.: СВЕН, 2016. С. 132—142.

10. Ковалёв А.В., Матвеев В.И., Кошкин В.В., Хижняк С.А. Тепловой контроль авиационных конструкций // MEGATECH. Новые технологии в промышленной диагностике и безопасности. 2011. № 2—3. С. 16—22. 11. *Meola C., Boccardi S., Boffa N.D., Ricci F., Carlomagno G.M.* Infrared thermography to evaluate impact damaging of composites. ECCM16 — 16th European conference on composite materials, Seville, Spain, 22—26 June 2014.

12. Meola C., Carlomagno G.M., Ricci F., Lopresto V., Caprino G.. Investigation of Impact Damage in Composites with Infrared Thermography /6th NDT in Progress, Prague (Czech Republic), 10—12 October 2011. Ed. P. Mazal. 2011. P. 175—182.

13. *Halliwell S.* NCN Best Practice Guide — Repair of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Structures / NetComposites, 2007. P. 23.

14. *Świderski W., Szabra D., Szudrowicz M.* Nondestructive testing of composite armours by using IR thermographic method / Proceedings of 9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography — QIRT 2008 (July 2—5, 2008, Krakow — Poland). 5 p.

— QIRT 2008 (July 2—5, 2008, Krakow — Poland). 5 p.
15. Péronnet E., Pastor M.-L., Huillery R., Dalverny O., Mistou S., Welemane H. Non destructive investigation of defects in composite structures by three infrared thermographic techniques / Proceeding of International conference on experimental mechanics ICEM 15 (22—27 July 2012, Porto, Portugal). 8 p.

16. *Ptaszek G.S.* Investigation and development of transient thermography for detection of disbonds in thermal barrier coating systems. A thesis submitted to Imperial College London for the degree of Doctor of Engineering. London, England. 2012. 176 p.

17. Программное обеспечение ALTAIR, Версия 5, FLIR SYSTEMS, 2008 г.

18. Программное обеспечение «Неразрушающий контроль авиационных и космических материалов методом активной количественной инфракрасной термографии (AQIRT)». Томский политехнический университет, 2018.

19. ГОСТ Р 53698—2009 «Контроль неразрушающий. Методы тепловые. Термины и определения».

20. ГОСТ Р ИСО 18434—1—2013. Контроль состояния и диагностика машин. Термография. Часть 1. Общие методы (аналогичен: ISO 18434—1:2008. Condition monitoring and diagnostics of machines — Thermography — Part 1: General procedures).

21. Казьмин Е.А., Вавилов В.П. Сравнение методов обработки термоизображений при тепловом неразрушающем контроле образцов из ПКМ / Материалы III Отраслевой конференции по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов. КИМИЛА-2018. Вып. 3. 2018. С. 387—396.

22. Система неразрушающего контроля. Виды (методы) и технология неразрушающего контроля. Термины и определения / Справочное пособие. Серия 28. Вып. 4. Колл. авт. М.: Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2003.

Дефектоскопия № 9 2020