

УДК 629.735.083.02/03:620.179

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ИЗДЕЛИЯХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА АВИАПРЕДПРИЯТИЯХ

А.В. КОПЫЛОВ, Б.В. ЗУБКОВ

В статье рассмотрены актуальные проблемы, с которыми сталкиваются эксплуатационные авиапредприятия при неразрушающем контроле изделий из композиционных материалов, применяющиеся в воздушных судах и имеющие ряд особенностей при выявлении повреждений в виду сложности их структуры. Предложены пути решения этих проблем.

Ключевые слова: воздушные суда, неразрушающий контроль, композиционные материалы, дефектоскопия.

Введение

В настоящее время композиционные материалы (КМ) – углепластик, стеклопластик, высокотемпературные углерод-углеродные, углерод-керамические КМ с защитными покрытиями и др., обладающие рядом преимуществ перед металлами по удельной прочности, жесткости и т.д., широко применяются в элементах конструкции воздушных судов (ВС) как отечественного, так и зарубежного производства (рис. 1а-в): планер самолетов SSJ 100 (рис. 1а), MC-21 (рис. 1в), Ил-96-300, Ту-204, Ту-204СМ, В-737, В-787 «Dreamliner», А 380; авиационные двигатели (АД) ПС-90А (рис. 1в), CFM-56, SaM-146 и др. Эффективность использования КМ в конструкции планера и АД состоит в снижении веса конструкции при сохранении в ней требуемой прочности, уменьшении расхода топлива, эксплуатации по состоянию.

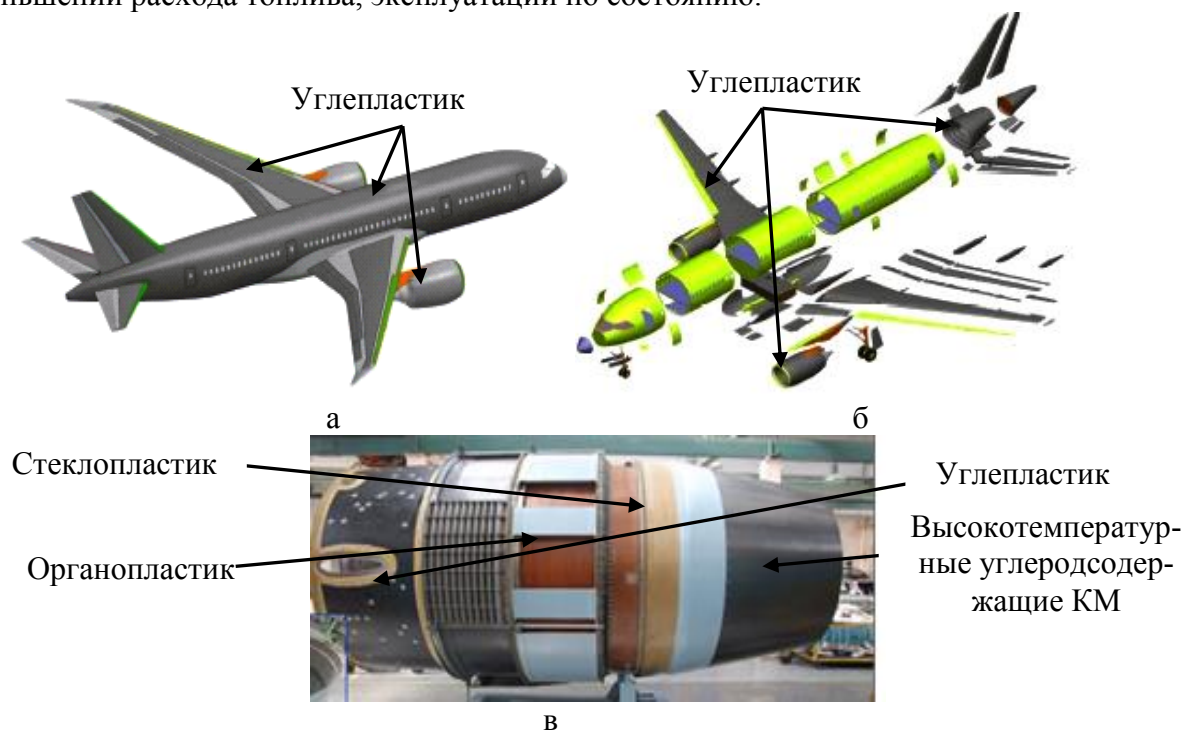


Рис. 1. Применение композиционных материалов в конструкции ВС:
а - самолёт В-787 «Dreamliner»; б - семейство отечественных самолётов SSJ 100,
Иркут MC-21; в - авиационный двигатель ПС-90 А [1]

При эксплуатации ВС по состоянию, что фактически означает отказ от плановых капитальных ремонтов, приводит к тому, что базы данных о дефектном состоянии изделий из КМ сильно сужены. Если для конструкций ВС из традиционных материалов (металлы и металлические сплавы) статистика повреждений по самолетам-аналогам еще достаточно репрезентативна, и её можно использовать для прогнозирования техсостояния конструкций ВС, то ситуация с изделиями из КМ значительно сложнее [2]. Существующие стандартные методы и средства контроля изделий ВС в полной мере отработаны на металлических материалах.

Поэтому к достоверности результатов неразрушающего контроля (НК) композитов на этапе технической эксплуатации (ТЭ) предъявляются высокие требования, так как это является необходимой информацией при решении задач безопасности полетов, прогнозирования технического состояния изделий ВС из КМ, осуществляемые на авиапредприятиях отделом поддержания летной годности и надёжности ВС.

Также результаты расчётов размеров критических повреждений, значений критической нагрузки, оценка долговечности и остаточного ресурса КМ с повреждением, установления причин возникновения повреждений изделий из КМ основываются на априорной информации - результаты НК, представляющие в процессе ТЭ информацию о локальности и координатах повреждений в изделиях из КМ.

Цель исследования: определение параметров неразрушающего контроля изделий ВС из КМ для выявления и предотвращения появления повреждений в КМ, а не на "борьбу" с отклонениями и повторяющимися повреждениями на этапе эксплуатации.

1. Изделия из композиционных материалов – сложный объект неразрушающего контроля на всех этапах их жизненного цикла

Проанализируем процессы накопления повреждений в изделиях из КМ на этапе эксплуатации. Особенностью этих процессов является наличие так называемого «инкубационного» периода, в процессе которого не происходит существенного изменения структуры материала, а прочностные характеристики остаются приблизительно на одном уровне. Длительность инкубационного периода существенно зависит от уровня действующих напряжений и температуры. После инкубационного периода в композитах идёт рост скорости накопления повреждений с последующим её замедлением [2].

Процесс накопления повреждений с течением времени t_i в неметаллических КМ, в отличие от металлов, носит нелинейный характер и описывается функцией $\Pi(\sigma_{\text{э}i}, t_i)$, являющейся нелинейной моделью накопления повреждений, основанной на физической сущности деформирования композиционного материала, которую можно представить в виде общего математического выражения [2]

$$\Pi(\sigma_{\text{э}i}, t_i) = \left(\frac{t_i - t_i^{\text{ин}}}{t_i^* - t_i^{\text{ин}}} \right)^{m_i}, \quad (1)$$

где t_i - время действия эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{э}i}$; $t_i^{\text{ин}}$ - время инкубационного периода повреждения в неметаллических композитах; t_i^* - долговечность, зависящая от предела длительной прочности σ^* ; m_i - степень нелинейности накопления повреждений, являющаяся характеристикой материала, зависящая от предыстории нагружения и, в том числе, от уровня эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{э}i}$ на i -й ступени нагружения.

Соотношение (1) учитывает наличие времени инкубационного периода $t_i^{\text{ин}}$ и время действия t_i эквивалентного напряжения $\sigma_{\text{э}i}$ при ступенчатом изменении нагрузки.

При ступенчатом нагружении изделий из КМ для оценки остаточного ресурса Δt_N на N -м цикле нагружения может применяться соотношение [2]

$$\Delta t_N = (t_N^* - t_N^{\text{ин}}) - [\Pi(\sigma_{\text{э}(N-1)}; \Delta t_{N-1})]^{1/m_i}, \quad (2)$$

где Δt_N – остаточный ресурс на N-й ступени нагружения; t_N^* – долговечность на N-м цикле нагружения, зависящая от предела длительной прочности σ^* ; $\Pi(\sigma_{N-1}; \Delta t_{N-1})$ – функция, характеризующая процесс накопления повреждений в неметаллических КМ на предыдущем N-1 цикле, где σ_{N-1} – эквивалентное напряжение на предыдущем N-1 цикле; Δt_{N-1} – время действия эквивалентного напряжения σ_{N-1} на предыдущем N-1 цикле.

Но наиболее сложным объектом контроля, по сравнению с изделиями из полимерных КМ, являются изделия из высокотемпературных углеродсодержащих КМ с защитными покрытиями, применяющимися в современных АД. Они имеют ряд особенностей: многокомпонентная структура, где углеродные волокна распределены в объеме углеродной или керамической матрицы и образуют с ней большое количество границ раздела, виды защитных покрытий, разброс теплофизических, прочностных характеристик (анизотропия), виды эксплуатационного нагружения, большое разнообразие типов производственно-технологических дефектов и эксплуатационных повреждений (рис. 2).

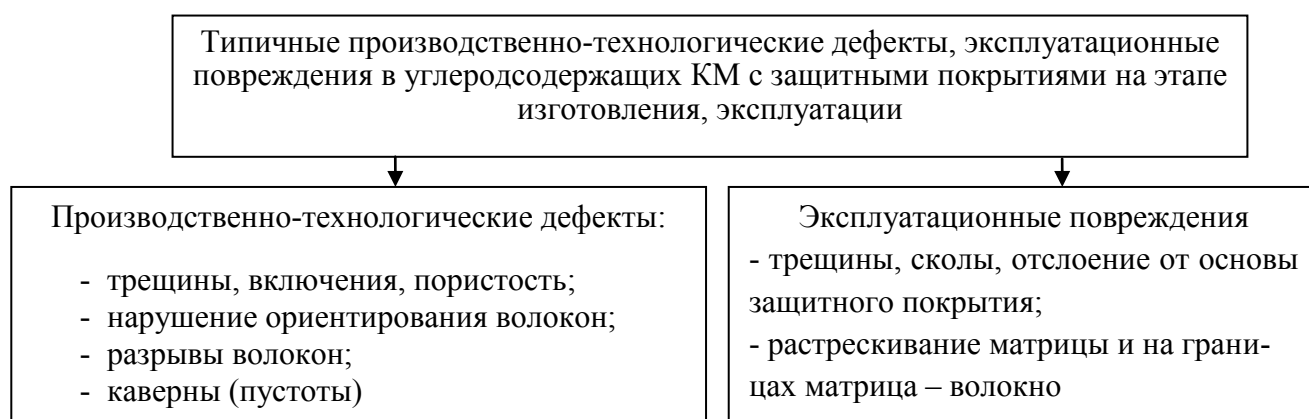


Рис. 2. Типичные дефекты, эксплуатационные повреждения в углеродсодержащих КМ с покрытиями

2. Определение параметров автоматизированного ультразвукового неразрушающего контроля изделий из КМ на авиапредприятиях

Ввиду повышения показателя основной трудоёмкости при выполнении операций диагностирования ручным способом над изделиями из неметаллических композитов и их низкого уровня контролепригодности при использовании традиционных физических методов НК, важная роль в получении наиболее достоверной информации о дефекте, повреждении в КМ на этапах изготовления и эксплуатации отводится методике и приборному оборудованию по автоматизированной дефектоскопии на базе ультразвукового (УЗ) дефектоскопа (рис. 3), обладающими рядом преимуществ перед ручным контролем [3]:

- применение многоканальных систем, т.е. с большим количеством параллельно действующих преобразователей и соответствующих приборных блоков, обеспечивает повышение производительности контроля;
- обеспечение повышения надёжности контроля по сравнению с ручным контролем, т.к. результаты дефектоскопии при автоматизированном контроле не зависят от субъективных качеств контролёра;
- применение вычислительной техники для решения многих задач автоматизации УЗ контроля, обработки и представления информации, что позволяет осуществлять оптимальный выбор параметров контроля изделия с учётом его индивидуальных особенностей, в частности, учёт неровности поверхности изделия, высокого затухания ультразвуковых волн на границах раздела компонентов.



Рис. 3. Автоматизированная установка для комплексной многоканальной дефектоскопии сложнопрофильных среднегабаритных конструкций из полимерных и углеродсодержащих КМ

На модельных образцах выполнен выбор метода УЗ исследования, дефектоскопа и определены оптимальные значения параметров контроля - частота, амплитуда, время задержки УЗ волны, на базе которых при ТЭ ВС может проводиться автоматизированная комплексная многоканальная УЗ дефектоскопия натуральных изделий из углеродсодержащих КМ с покрытиями. Результаты исследования представлены в табл. 1, 2.

Толщины модельных образцов выбирались из условия предполагаемой толщины стенки изделий из углеродсодержащих КМ с покрытиями, их разнотолщинности ± 2 мм, толщины стыка деталей ~ 8 мм.

Таблица 1

Результаты выбора метода, дефектоскопа и определения значений параметров УЗ контроля изделий из углеродсодержащих КМ с защитными покрытиями

Марка ультразвукового дефектоскопа	Метод УЗ контроля	Рабочая частота УЗ колебаний ν , [кГц]	Минимальные размеры дефекта, [см ²]	Амплитуда УЗ сигнала, [дБ]	Скорость УЗ волны, [м/с]
УД 2Н-ПМ, НПЦ «Кропус»	Теневой или зеркально-теневой	60	1×1	8±6	3000
УСД-60, НПЦ «Кропус»	Теневой	200	1,5×1	8±9	3500

Таблица 2

Результаты определения значений времени задержек, полученных на УЗ дефектоскопе УСД-60 от толщин бездефектных модельных образцов из углеродсодержащих с защитными покрытиями

Толщина образцов, δ [мм]	Время задержки, [мкс]		
	$t_{\text{зад1}}$	$t_{\text{зад2}}$	$t_{\text{зад3}}$
3	8,2	8,3	8,5
5	9,6	9,7	9,8
8	10,97	11,1	11,2

Получены тарировочные графики $t_{\text{зад}}(\delta)$ (рис. 4) времени задержки $t_{\text{зад}}$ сигнала УЗ волны, которое может выставляться на дисплее дефектоскопа при автоматизированном УЗ контроле натуральных изделий, от толщины стенки δ бездефектного модельного образца из углеродсодержащего КМ с покрытием с учетом высокого затухания на границах раздела подложка-покрытие, матрица-волокно.

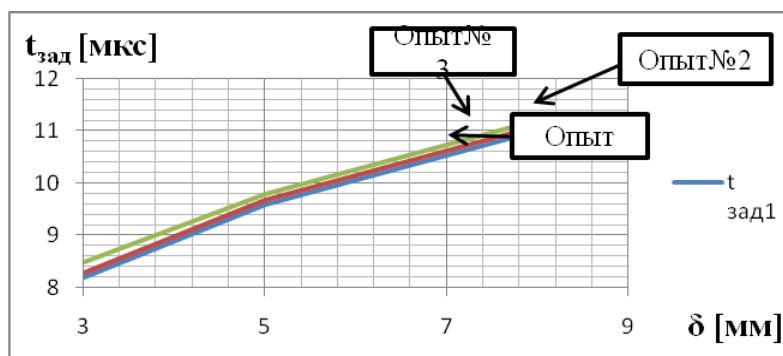


Рис. 4. Зависимости времени задержки $t_{\text{зад}}$ сигнала УЗ волны от толщины стенки δ изделия из углеродсодержащих КМ с покрытиями

По экспериментальным значениям $t_{\text{зад}}$, δ в программе Excel определяются аналитические выражения зависимости $t_{\text{зад}}(\delta)$, содержащие степенные функции:

$$t_{\text{зад1}} = 5,91 \cdot \delta^{0,2996}; t_{\text{зад2}} = 6 \cdot \delta^{0,2965}; t_{\text{зад3}} = 6,23 \delta^{0,2812}, \quad (3)$$

где $t_{\text{зад}}$ – время задержки, [с]; δ – толщины образцов, [мм].

По вычисленным значениям параметров УЗ контроля на модельных образцах получены результаты автоматизированного УЗ контроля натурального изделия из углеродсодержащих КМ, представленные в виде дефектограммы (рис. 5). При этом учитывались: пороговое значение УЗ сигнала; расстояние для объединения единичных эксплуатационных повреждений (дефектов) – максимальное расстояние между двумя единичными повреждениями (дефектами), при котором оба дефекта объединяются в один; не учитывать единичные повреждения (дефекты) менее – максимальная площадь единичного локализованного повреждения (дефекта), при которой он не рассматривается как существенный и информация о нем не выводится. Однако общая площадь таких неучтенных повреждений (дефектов) выводится в конце отчёта о результате анализа (рис. 5).

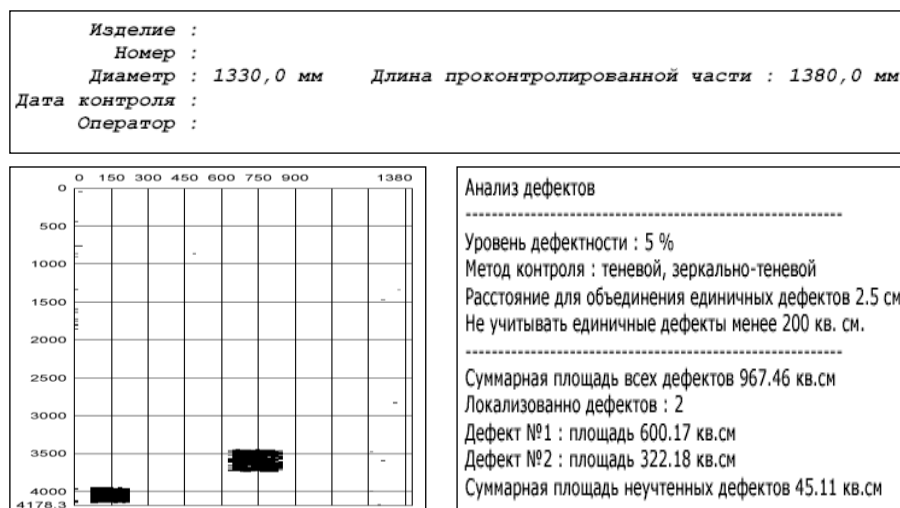


Рис. 5. Дефектограмма изделия из углеродсодержащих КМ (реактивное сопло)

Выводы

1. Проведение автоматизированного ультразвукового неразрушающего контроля изделий из КМ, применяющихся в ВС, с целью выявления внутренних дефектов композита (вид дефекта (трещина, расслоение), уровень критичности, оценка линейных размеров (локальность), расположение (координаты в плоскости ХУ, глубина залегания Z) и др.) позволяет:

- получить исходную информацию для решения задач по выявлению аналитических зависимостей несущей способности конструкций из КМ при наличии в ней дефектов различных видов;
- получить априорную информацию для определения причины возникновения повреждений в изделиях из КМ, прогнозировании их остаточного ресурса с повреждениями с целью определения периодичности контроля;
- выдать рекомендации по изменению технологического процесса и способам восстановления (необходимого ремонта) изделий из неметаллических КМ.

2. Выполнен выбор метода ультразвукового исследования углеродсодержащих КМ с покрытиями – теневой или зеркально-теневой, дефектоскопы УСД-60, УД 2Н-ПМ и определены значения параметров УЗ сигнала – частота, время задержки, амплитуда для автоматизированного ультразвукового НК, которые обеспечивают обнаружение дефектов минимальных размеров $1 \times 1 \text{ см}^2$ с учетом высокого затухания УЗ сигнала в углеродсодержащих КМ, используемых в элементах сложнопрофильных конструкций авиационного ГТД.

3. Получены эмпирические зависимости времени задержки $t_{\text{зад}}$ сигнала УЗ волны от стандартной толщины стенки δ изделий из углеродсодержащих КМ с учетом высокого затухания на границах раздела компонентов, что позволяет по графикам определять время задержки $t_{\text{зад}}$ УЗ сигнала при переменном значении толщины стенки изделий из КМ с учетом их разнотолщинности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Разработка технологии создания высоконагруженных деталей перспективных авиационных двигателей из композиционных материалов на полимерной, керамической, металлической матрицах. Презентация на НТС ОАО «Авиадвигатель», Пермь, 2009.
2. **Лебедев И.К.** Эксплуатационная долговечность элементов авиаконструкций из композиционных материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. - М.: МГТУ ГА, 2011.
3. **Будадин О.Н., Кутюрин В.Ю., Филипенко А.А.** Промышленный стенд автоматизированной комплексной многоканальной дефектоскопии сложнопрофильных среднегабаритных конструкций из углеродных и полимерных композиционных материалов. - М.: НПЦ «Крокус», 2003.

**FEATURES OF NON-DESTRUCTIVE DAMAGE CONTROL OF AIRCRAFT PARTS
MADE OF COMPOSITE MATERIALS AT THE ENTERPRISES OF AVIATION INDUSTRY**

Kopylov A.V., Zubkov B.V.

The article describes the urgent problems which can arise at enterprises of aviation industries by the operating air during non-destructive damage control of products made of composite materials used in aircraft. The methods of control are very specific due to have a number of peculiarities in detecting damages in view of the complicated composite materials structure.

Key words: aircraft, nondestructive control, composite materials, defectoscopy.

Сведения об авторах

Копылов Алексей Васильевич, 1981 г.р., окончил МГТУ ГА (2005), соискатель МГТУ ГА, сотрудник ОКБ ОАО «МВЗ им. М.Л. Миля», автор 8 научных трудов, область научных интересов - безопасность полетов, организация технического контроля качества продукции, системы контроля качества и сертификации продукции.

Зубков Борис Васильевич, 1940 г.р., окончил КИИГА (1966), действительный член Академии наук авиации и воздухоплавания, доктор технических наук, профессор кафедры безопасности полётов и жизнедеятельности МГТУ ГА, автор более 140 научных работ, область научных интересов – вопросы обеспечения безопасности полётов и жизнедеятельности, авиационной безопасности.