

УДК 620.179

А.С. Бойчук¹, И.А. Диков¹, А.С. Генералов¹, С.И. Яковлева¹

ОСОБЕННОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ МОНОЛИТНЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА В ПРОЦЕССЕ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ НА МАЛОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-108-115

Приведены результаты ультразвуковых исследований образцов из углепластика в процессе проведения испытаний на малоцикловую усталость. Установлено, что в процессе и после проведения циклических механических испытаний образцов при их ультразвуковом неразрушающем контроле с использованием эхо-импульсного метода необходимо проводить специальную корректировку усиления дефектоскопа, а также чувствительности контроля в зависимости от падения амплитуды донного эхо-сигнала относительно настроечного образца.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, неразрушающий контроль, ультразвуковой контроль, эхо-импульсный метод, механические испытания.

A.S. Boychuk¹, I.A. Dikov¹, A.S. Generalov¹, S.I. Yakovleva¹

THE FEATURES OF NON-DESTRUCTIVE INSPECTION OF CARBON FIBER REINFORCED PLASTIC SOLID LAMINATE SAMPLES DURING LOW-CYCLIC FATIGUE TESTING

The results of CFRP samples ultrasonic inspection during low-cyclic fatigue testing are given in this article. It is established that for ultrasonic pulse-echo inspection during cycling mechanical testing and after the special correction of flaw detector's gain and inspection's sensitivity concerning back-wall echo decreasing in compare with testing specimen is necessary.

Keywords: fibre-reinforced plastics, nondestructive testing, ultrasonic testing, pulse-echo method, mechanical tests.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Разработка и внедрение новых полимерных композиционных материалов (ПКМ) [1–7] и технологий производства из них деталей и конструкций авиационной и космической техники [8–10] в настоящее время является одной из приоритетных задач. Современные элементы конструкций, такие как силовые детали летательных аппаратов, арочные конструкции мостовых сооружений и многое другое, в последние годы в все большей степени изготавливают из ПКМ, в особенности из углепластика. Широкое применение ПКМ связано с тем, что эти материалы позволяют существенно снизить массу и повысить прочность конструкции. Одним из наиболее важных звеньев при разработке новых материалов и технологий является проведение неразрушающего контроля с целью проверки качества изготавливаемой продукции. Как известно, в процессе изготовления ПКМ могут иметь место нарушение сборки пакета перед формованием, неправильно подобранные режимы формования, сбой в процессе формования. Все это

может привести к возникновению нарушений сплошности (дефектов) в готовой продукции. К наиболее распространенным производственным внутренним дефектам ПКМ можно отнести пористость, непропитку, расслоения, посторонние включения. Кроме того, рост дефектов производства и появление новых дефектов может иметь место в процессе физико-механических испытаний, в частности на малоцикловую усталость. Иногда при проведении испытаний в образцы намерено закладывают искусственные дефекты, для того чтобы изучить, как они будут вести себя под действием циклических механических нагрузок, а также как влияют на прочность.

В настоящее время для неразрушающего контроля монолитных изделий из ПКМ успешно применяются ультразвуковые эхо-импульсный и теневой методы [11–17]. Ультразвуковые методы контроля основаны на анализе параметров упругих волн, возбуждаемых в объекте контроля. В случае эхо-импульсного контроля анализируется сигнал, отраженный от дефекта, а при теневом методе следят за сигналом, прошедшим сквозь объект контроля. Во ФГУП «ВИАМ» выпущен ряд нормативных документов по применению данных методов при контроле изделий из монолитного пластика – от плоских панелей до конструктивно сложных изделий. Данные методы обеспечивают наибольшую чувствительность контроля, что очень важно при контроле образцов перед проведением физико-механических испытаний, а также в процессе их проведения. Эхо-импульсный метод применяется чаще, чем теневой, поскольку позволяет обеспечить более чувствительный контроль и помимо обнаружения дефектов и определения их площади еще и определить глубину их залегания. Кроме того, эхо-импульсный метод не требует двухстороннего доступа, что при определенных условиях очень важно. Основной недостаток данного метода – наличие приповерхностных неконтролируемых (мертвых) зон. В зависимости от толщины контролируемого изделия и его акустических свойств мертвые зоны могут составить от 0,3 до 1 мм. При использовании эхо-импульсного метода также необходимо обеспечивать стабильный акустический контакт между преобразователем и объектом контроля и применять специальные контактные жидкости, что при определенных условиях является непростой задачей.

Проведение с высоким разрешением ультразвукового неразрушающего контроля образцов монолитных ПКМ перед проведением физико-механических испытаний было описано в работе [18]. Не менее важным является проведение контроля образцов при механических испытаниях, в том числе на малоцикловую усталость. При этом в процессе циклического нагружения необходимо наблюдать, как происходит рост дефектов, а также следить за появлением новых дефектов. В ходе испытаний под действием нагрузок образцы ПКМ могут получать микрповреждения, что влечет за собой изменение их акустических свойств и требует внесения соответствующих корректировок при настройке и проведении ультразвукового неразрушающего контроля.

Во ФГУП «ВИАМ» проведены исследования и установлены особенности контроля монолитных ПКМ в процессе проведения физико-механических испытаний. Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.3. «Методы неразрушающих исследований и контроля» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [19].

Материалы и методы

Для проведения исследований применяли монолитные образцы из углепластика размером 250×20 мм и толщиной 5 мм (рис. 1), изготовленные по технологии автоклавного формования с последующей вырезкой из одной плиты.

Испытания на малоцикловую усталость образцов проводили с использованием испытательной машины Walter+Bai LFV-100 путем их нагружения при различной

нагрузке и количестве циклов. При испытаниях на малоцикловую усталость образцов из ПКМ на начальной стадии разрушения происходит накопление микрповреждений в виде растрескивания матрицы. Это обстоятельство приводит к ухудшению акустических свойств материала и, как следствие, к уменьшению чувствительности контроля. По мере увеличения количества циклов испытаний, а также изменения прикладываемой нагрузки, данные микрповреждения все больше накапливаются в материале и тем самым сильнее изменяют его акустические свойства. Испытания на малоцикловую усталость проводились не с целью определения физико-механических характеристик, а для получения в образцах микрповреждений перед их разрушением, поэтому условия проведения испытаний в данной статье не указаны. Степень накопления микрповреждений оценивали по амплитуде донного эхо-сигнала.



Рис. 1. Образцы из углепластика для испытаний на малоцикловую усталость и ультразвуковых исследований

Для проведения ультразвуковых исследований использовали как ручной контроль, если образец в процессе проведения испытаний на малоцикловую усталость нельзя снять с захватов испытательной машины, так и автоматизированный, если образцы допускается снимать с испытательной машины в процессе проведения испытаний.

Для ультразвуковых исследований ручным способом использовали ультразвуковой дефектоскоп OmniScan MX (Olympus NDT), фазированную решетку Olympus NDT 5L-64-NW1 с рабочей частотой 5 МГц, прямоугольную призму из полистирола SNW1-0L-NIC-C и кодировщик Encoder. Для создания акустического контакта использовали дистиллированную воду. Для проведения анализа результатов, полученных с использованием дефектоскопа OmniScan MX, применяли специальное программное обеспечение TomoView Analysis (Olympus NDT).

Для ультразвуковых исследований образцов автоматизированным способом использовали иммерсионную ультразвуковую установку ScanMaster LS-500 и фокусированный ультразвуковой одноэлементный пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП) с рабочей частотой 5 МГц. Исследования проводили в иммерсионной ванне (образцы полностью погружали в воду).

Все изготовленные образцы исследованы ультразвуковым эхо-импульсным методом до испытаний: они имели идентичные акустические свойства и дефектов не содержали, также для них определена максимально достижимая чувствительность контроля. При проведении ультразвуковых исследований использовали фокусировку ультразвукового пучка в середину толщины исследуемого образца, а критерием определения максимально достижимой чувствительности контроля было выполнение условия, при котором отношение амплитуды эхо-сигнала от плоскодонного отражателя к амплитуде эхо-сигналов шума структуры материала образца было не менее 8 дБ.

Результаты и обсуждение

Для всех исследуемых образцов из углепластика максимально достижимая чувствительность ультразвукового контроля с использованием высокочастотного эхоимпульсного метода до испытаний, как при ручном, так и при автоматизированном способе контроля, эквивалентна выявлению плоскодонного отражателя диаметром 2 мм, что является более высокой чувствительностью по сравнению со стандартными методиками контроля (в них, как правило, чувствительность контроля эквивалентна выявлению плоскодонного отражателя диаметром 5 мм и более).

По результатам проведения сравнения донных эхо-сигналов исходного образца 1 (не подвергнувшегося циклическим механическим нагрузкам) с образцами 2–4 после различных циклических механических нагрузок установлено, что падение амплитуды донных эхо-сигналов на образцах 2–4 в рабочей части составило 6, 10 и 14 дБ соответственно. Значения падения донных эхо-сигналов после циклических испытаний при ручном и автоматизированном контроле приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Результаты ультразвукового контроля образцов из углепластика ручным способом с использованием фазированной решетки в процессе испытаний на малоцикловую усталость

Условный номер образца	Падение амплитуды донного эхо-сигнала, дБ	Плоскодонный отражатель диаметром, мм						Положение отражателя
		2		3		4		
		Амплитуда эхо-сигнала от отражателя, %	Отношение «сигнал от отражателя/шум», дБ	Амплитуда эхо-сигнала от отражателя, %	Отношение «сигнал от отражателя/шум», дБ	Амплитуда эхо-сигнала от отражателя, %	Отношение «сигнал от отражателя/шум», дБ	
1	0	80	9,8	80	13,0	80	14,0	Средний
		80	9,8	80	13,0	80	14,0	Дальний
2	6	62	9,8	58	12,3	48	11,3	Средний
		50	8,0	56	12,0	58	13,0	Дальний
3	10	47	5,1	43	8,0	43	9,1	Средний
		59	7,1	55	9,4	56	11,4	Дальний
4	14	39	2,6	48	4,4	45	6,0	Средний
		35	1,6	65	5,7	72	10,7	Дальний

Таблица 2

Результаты ультразвукового контроля образцов из углепластика автоматизированным способом с использованием одноэлементных пьезоэлектрических преобразователей в процессе испытаний на малоцикловую усталость

Условный номер образца	Падение амплитуды донного эхо-сигнала, дБ	Плоскодонный отражатель диаметром, мм						Положение отражателя
		2		3		4		
		Амплитуда эхо-сигнала от отражателя, %	Отношение «сигнал от отражателя/шум», дБ	Амплитуда эхо-сигнала от отражателя, %	Отношение «сигнал от отражателя/шум», дБ	Амплитуда эхо-сигнала от отражателя, %	Отношение «сигнал от отражателя/шум», дБ	
1	0	80	11,2	80	11,2	80	13,4	Средний
		80	11,2	80	11,2	80	13,4	Дальний
2	6,8	61	9,7	75	10,6	51	8,6	Средний
		50	8,0	76	10,8	71	11,5	Дальний
3	8,8	35	6,3	43	6,6	43	8,1	Средний
		47	8,8	50	8,0	60	11,0	Дальний
4	12	39	5,0	53	8,5	43	8,1	Средний
		50	7,1	57	9,1	73	12,7	Дальний

Если вновь обратиться к стандартным методикам ультразвукового контроля монолитных деталей и конструкций из ПКМ с использованием эхо-импульсного метода, то в них при отличии акустических свойств настроечного образца (в данном случае таким является образец 1) и объекта контроля (образцы 2–4) проводится соответствующая корректировка усиления дефектоскопа (усиления принятого преобразователем сигнала), т. е. в точке временной регулировки чувствительности добавляется или убивается определенная величина усиления, которая определяется как разность амплитуд донных эхо-сигналов на настроечном образце (образец 1) и объекте контроля (образцы 2–4). При этом чувствительность контроля оставляют неизменной. Однако, как упомянуто ранее, в стандартных методиках ультразвукового контроля ПКМ чувствительность контроля не более выявления дефекта, эквивалентного плоскодонному отражателю диаметром 5 мм. При проведении ультразвукового контроля монолитных образцов после циклических механических нагрузок на повышенной чувствительности (в данном случае – это 2 мм), т. е. при выявлении дефектов, эквивалентных плоскодонным отражателям диаметром менее 5 мм, указанная ранее корректировка усиления может не срабатывать.

Для проверки этого предположения в образцах с полученной поврежденностью, а также в образце, не подвергавшемся циклическим механическим нагрузкам, просверлены «ближний» (на глубину 0,6 мм от поверхности ввода ультразвуковой волны в материал), «средний» (в середине исследуемого образца) и «дальний» (на глубину 0,6 мм относительно донной поверхности) плоскодонные отражатели диаметром 2; 3 и 4 мм (рис. 2).

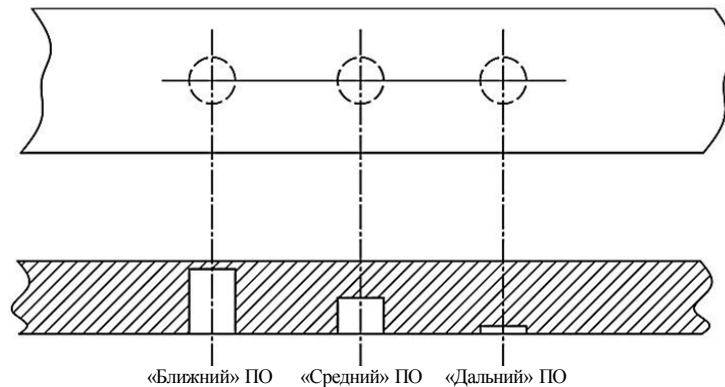


Рис. 2. Засверловка «ближнего», «среднего» и «дального» плоскодонных отражателей (ПО) в образцы

Проведена настройка дефектоскопа по плоскодонным отражателям диаметром 2 мм, изготовленным в образце 1, и проведен контроль таких же плоскодонных отражателей, изготовленных в образцах 2–4, с учетом корректировки усиления дефектоскопа из-за разностей в амплитудах донных эхо-сигналов. По результатам контроля измерены амплитуды эхо-сигналов от плоскодонных отражателей, изготовленных в середине толщины образцов («средний») и на глубину 0,6 мм относительно донной поверхности («дальний»), а также замерены отношения «сигнал от плоскодонного отражателя/шум». Точно такие же операции проделаны и для плоскодонных отражателей диаметром 3 и 4 мм. Результаты представлены в табл. 1 и 2. Амплитуды эхо-сигналов от «ближних» отражателей в образцах 2–4 практически равны эхо-сигналу от «ближнего» отражателя в образце 1, так как глубина залегания этих отражателей довольно мала, и затухание ультразвуковой волны, прошедшей от поверхности ввода до отражателя и обратно, изменяется незначительно, поэтому данные по ним в табл. 1 и 2 не представлены.

Анализируя данные из табл. 1 и 2, можно сделать вывод, что критерию, при котором отношение амплитуды эхо-сигнала от плоскодонного отражателя к амплитуде эхо-сигналов шума структуры материала образца, не менее 8 дБ не удовлетворяют: «средний» и «дальний» отражатели диаметром 2 мм в образце 3, «средние» и «дальние» отражатели диаметром 2 и 3 мм, а также «средний» отражатель диаметром 4 мм в образце 4 при контроле ручным способом с использованием фазированной решетки, а при контроле автоматизированным способом с использованием одноэлементных ПЭП – «средние» отражатели диаметром 2 и 3 мм в образце 3, «средний» и «дальний» отражатели диаметром 2 мм в образце 4. Кроме того, во всех образцах после испытаний наблюдается снижение амплитуды отраженного эхо-сигнала от плоскодонных отражателей, что, вероятно, связано с ухудшением акустических свойств образцов (увеличения падения амплитуды донных эхо-сигналов в образцах) вследствие накопления в них микроповреждений. Из данных табл. 1 и 2 также видно, что падение амплитуды отраженного эхо-сигнала от «средних» плоскодонных отражателей в большинстве случаев больше, чем падение амплитуды от «дальних» отражателей. Это может быть связано с неравномерным распределением накопленных микроповреждений по толщине образца и, как следствие, неравномерным затуханием ультразвукового сигнала по глубине материала.

Таким образом, можно сделать вывод, что такой меры, как ввод корректировки временной регулировки чувствительности недостаточно для достоверного выявления дефектов в образцах после циклических механических испытаний. Поэтому одним из вариантов выходов является дифференцированное «загрубление» чувствительности (увеличение размера выявляемого дефекта) в зависимости от акустических свойств образцов, которые косвенно оцениваются по падению амплитуды донного эхо-сигнала в образце.

Заключения

Проведены ультразвуковые исследования образцов из углепластика в процессе испытаний на малоцикловую усталость. Различная повреждаемость образцов в процессе испытаний получена путем изменения нагрузки и количества циклов. Изменение амплитуд донных сигналов в испытанных образцах относительно исходного состояния составило от 6 до 14 дБ.

Анализ результатов ультразвуковых исследований, приведенных в табл. 1 и 2, показывает, что при проведении ультразвукового контроля образцов из углепластика в процессе циклических механических испытаний, при которых имеет место появление и накопление микроповреждений, необходимо по мере накопления микроповреждений, которое оценивается по падению амплитуды эхо-сигнала от донной поверхности, корректировать не только усиление, но и чувствительность контроля. При определенном значении падения амплитуды донного эхо-сигнала чувствительность необходимо «загрублять» до тех пор, пока амплитуды эхо-сигналов от отражателей не будут превышать порог обнаружения, а запас по шумам составлять не менее 8 дБ.

Одновременно с этим установлено, что микроповреждения, растрескивание матрицы, также как и пористость [20], вследствие особенностей механики разрушения могут неравномерно распределяться в объеме материала, из-за чего дефект одного и того же размера (несмотря на корректировку и увеличение диаметра контрольного отражателя) может выявляться по-разному. Решением этой задачи может стать введение не линейной корректировки временной регулировки чувствительности, а коррекции усиления поглубинно в зависимости от распределения микроповреждений в объеме материала. Для этого возможно использовать сигналы структурных шумов.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.
2. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. №7–8. С. 54–58.
3. Савин С.П. Применение современных полимерных композиционных материалов в конструкции планера самолетов семейства МС-21 // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. №4 (2). С. 686–693.
4. Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Мухаметов Р.Р., Панина Н.Н. Разработки ФГУП «ВИАМ» в области расплавных связующих для полимерных композиционных материалов // Полимерные материалы и технологии. 2016. Т. 2. №2. С. 37–42.
5. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
6. Куцевич К.Е., Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф., Тюменева Т.Ю. Клеевые препреги – перспективные материалы для деталей и агрегатов из ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 379–387. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-379-387.
7. Коган Д.И., Чурсова Л.В., Панина Н.Н. и др. Перспективные полимерные материалы для конструкционных композиционных изделий с энергоэффективным режимом формования // Пластические массы. 2020. №3–4. С. 52–54.
8. Мишкин С.И., Раскутин А.Е., Евдокимов А.А., Гуляев И.Н. Технологии и основные этапы строительства первого в России арочного моста из композиционных материалов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2017. №6 (54). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.02.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-5-5.
9. Тимошков П.Н. Оборудование и материалы для технологии автоматизированной выкладки препрегов // Авиационные материалы и технологии. 2016. №2 (41). С. 35–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-35-39.
10. Вешкин Е.А. Особенности безавтоклавного формования низкопористых ПКМ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2016. №2 (38). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.02.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-7-7.
11. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. 2-е изд., испр. М.: Машиностроение, 2006. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. 864 с.
12. Борисенко В.В. Автоматизация неразрушающего контроля композиционных материалов // В мире неразрушающего контроля. 2020. Т. 23. №2. С. 4–7.
13. Борисков Ю.В. Когерентная адаптивная фокусировка для контроля композитов со сложной геометрией // В мире неразрушающего контроля. 2020. Т. 23. №2. С. 9–12.
14. Бойчук А.С., Чертищев В.Ю., Диков И.А., Генералов А.С. Оценка возможности определения пористости в углепластике ультразвуковым теневым методом // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2017. №7 (55). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.07.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-11-11.
15. Бойчук А.С., Генералов А.С., Далин М.А., Диков И.А. Контроль монолитных деталей и конструкций авиационной техники, изготавливаемых из ПКМ, ультразвуковым методом неразрушающего контроля с использованием фазированных решеток // Сб. тр. X Всерос. конф. ТестМат «Основные тенденции, направления и перспективы развития методов неразрушающего контроля в аэрокосмической отрасли». М.: ВИАМ, 2018. С. 18–31. URL: <https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1063.pdf> (дата обращения: 21.08.2020).
16. Brotherhood C.J., Drinkwater B.W., Freemantle R.J. An ultrasonic wheel-array sensor and its application to aerospace structures // Insight. 2003. Vol. 45. No 11. P. 729–734.
17. Стариковский Г.П., Карабутов А.А., Курятин А.А. Неразрушающий контроль интегральных конструкций из полимерных композиционных материалов // В мире неразрушающего контроля. 2011. №4. С. 61–65.

18. Бойчук А.С., Диков И.А., Генералов А.С. Повышение чувствительности и разрешающей способности ультразвукового неразрушающего контроля монолитных образцов из ПКМ с использованием фазированных решеток // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. №3 (56). С. 83–88. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-83-88.
19. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
20. Бойчук А.С., Чертищев В.Ю., Диков И.А., Генералов А.С., Славин А.В. Влияние морфологии пор на ультразвуковой контроль пористости в углепластике эхо-импульсным методом // *Контроль. Диагностика*. 2018. №8. С. 22–29.