

УДК 678.747.2

А.С. Бойчук¹, И.А. Диков¹, А.С. Генералов¹, В.Ю. Чертищев¹

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ОБРАЗЦОВ В ПРОЦЕССЕ РАЗРАБОТКИ И ИСПЫТАНИЙ НОВЫХ МАРОК УГЛЕПЛАСТИКА

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-86-95

Приведены результаты неразрушающих исследований образцов из углепластика на стадиях разработки и испытаний. Для контроля монолитных плит и образцов изогнутой балки из углепластика наиболее подходящим является ультразвуковой эхо-импульсный метод. Показано, что в процессе разработки режимов формования новых марок углепластиков проведение ультразвукового контроля позволяет оптимизировать режим, а на стадиях испытаний – исключать дефектные образцы и оценивать характер и размеры повреждений, появляющихся после испытаний.

Ключевые слова: углепластик, плоские панели, изогнутая балка, неразрушающий контроль, ультразвуковой контроль, эхо-импульсный метод.

A.S. Boychuk¹, I.A. Dikov¹, A.S. Generalov¹, V.Yu. Chertishchev¹

ULTRASONIC TESTING OF SPESIMENS AT THE DEVELOPMENT AND TESTING PROCESS OF NEW CFRP GRADES

Nondestructive testing results of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) specimens at the development and testing process are given at that paper. Ultrasonic pulse-echo technique is the most applicable for CFRP monolithic panels and curved beam specimens testing. It is shown that ultrasonic testing allows optimizing the mode in the process of developing molding modes for new CFRP grades. At the test stages it allows to exclude defective specimens from the testing process and estimate the sorts and damage sizes after the tests.

Keywords: carbon fiber reinforced plastics, flat panels, curved beam, nondestructive testing, ultrasonic testing, pulse-echo technique.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute»]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Разработка новых полимерных композиционных материалов, технологий изготовления из них образцов и конструкций [1–7], а также проведение испытаний неразрывно связаны с неразрушающими методами контроля. Благодаря проведению неразрушающего контроля (НК) появляется возможность контролировать качество выпускаемой продукции без ее разрушения, проводить корректирующие мероприятия по выбору режимов изготовления, исключать дефектные образцы из проведения различных прочностных испытаний, а также обнаруживать дефекты, появляющиеся в процессе самих испытаний, и оценивать их размеры.

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») [8].

Для НК полимерных композиционных материалов широко применяют акустические [9–13] и радиационные методы [13–16]. Тем не менее предпочтение отдают акустическим методам ввиду их больших возможностей и безопасности, из которых наибольшее применение находят эхо-импульсный, теневой, импедансный и ударно-акустический методы. При контроле монолитных изделий из углепластика предпочтение отдают эхо-импульсному методу ввиду его более высокой чувствительности контроля, большей информативности, а также ввиду использования одностороннего доступа к объекту контроля. В случае высокого затухания в углепластике объекты контроля контролируют ультразвуковым амплитудным теневым методом.

В настоящее время разрабатывается большое количество новых марок углепластиков для авиационной и космической промышленности (для изготовления деталей и конструкций различного назначения – от высоконагруженных деталей и конструкций до различных деталей интерьера). Одной из основных задач при разработке новых марок углепластиков является правильный выбор режимов их изготовления. Неправильный подбор режима формования, сборки пакета перед формованием может привести к появлению в готовой продукции различных несплошностей (дефектов) – как правило, это высокая пористость или недопропитка. Проведение НК в процессе выбора режимов формования позволяет оптимизировать режимы благодаря обнаружению появляющихся зон с несплошностями и исключить их появление в будущем.

При проведении различных физико-механических испытаний при разработке новых марок углепластиков наличие дефектов в испытываемых образцах может привести к большому разбросу значений определяемых характеристик. Кроме того, если все испытываемые образцы будут дефектными, то определяемые механические характеристики разрабатываемых материалов могут быть заведомо заниженными. Поэтому очень важно перед проведением испытаний проверять образцы на наличие дефектов методами НК. Особенно важно проводить контроль с его максимально возможной чувствительностью, чтобы выявлять не только крупные дефекты, но и мелкие, оказывающие влияние на результаты механических испытаний. Например, наличие повышенной пористости в углепластике может привести при испытаниях к снижению прочности при сжатии и сдвиге на 20–40 % [17].

Не менее важным является проведение НК образцов из углепластика в процессе и после воздействия механических нагрузок и климатических факторов. В данном случае необходимо определить, например, размер ударного повреждения или разрушений после испытаний, а также оценить степень накопления микрповреждений в образцах.

Материалы и методы

Для проведения исследований по НК образцов из углепластика на различных стадиях их разработки и испытаний использовали: образцы из углепластика, отформованные по двум разным режимам; фрагменты панелей изогнутой балки до и после механических испытаний; плоские плиты с мелкими дефектами; образцы с ударными повреждениями; разрушенный образец после испытаний на изгиб.

В качестве оборудования, применяемого при проведении исследований, использовали автоматизированную ультразвуковую установку ScanMaster LS-500 с фокусированным ультразвуковым иммерсионным преобразователем с рабочей частотой 5 МГц и дефектоскоп OmniScan MX с ультразвуковыми линейной и секторной фазированными решетками с рабочей частотой 5 МГц. Для анализа и обработки результатов применяли специальное программное обеспечение.

Исследования проводили ультразвуковым эхо-импульсным методом с использованием продольных акустических волн.

Результаты и обсуждение

*Ультразвуковой контроль углепластиков
в процессе выбора оптимальных режимов формования*

Выявление несплошностей (пористости, непропитки) на этапе выбора режимов формования при разработке новых марок углепластиков является очень важной и актуальной задачей. Одной из вспомогательных операций может быть проведение ультразвукового неразрушающего контроля. Особенно это относится к формованию углепластиков по безавтоклавным технологиям и методом инфузии. Неразрушающий ультразвуковой контроль плоскопараллельных монолитных плит из углепластика после их формования проводят с применением ультразвуковых дефектоскопов и обычных одноэлементных преобразователей или линейных фазированных решеток путем продольно-поперечного сканирования по всей поверхности плиты с построением *C*-сканов (результатов контроля в виде цветных изображений на виде в плане).

На рис. 1, *а*, *б* в виде *C*-сканов по донному эхо-сигналу показаны результаты ультразвукового контроля плит из углепластика, отформованных по вакуумно-препреговой технологии. Данные исследования проведены с использованием дефектоскопа OmniScan MX, ультразвуковой линейной фазированной решетки Olympus NDT 5L-64-NW1 с рабочей частотой 5 МГц и специального кодировщика для построения *C*-скана. На *C*-сканах каждой точке цветного изображения соответствует определенная величина амплитуды эхо-сигнала, отраженного от донной поверхности образца. Градации от белого до красного соответствует величина амплитуды сигнала от 0 до 100 % высоты экрана *A*-скана дефектоскопа. Чем выше амплитуда эхо-сигнала от донной поверхности, тем лучше ультразвуковой сигнал проходит через исследуемый образец.

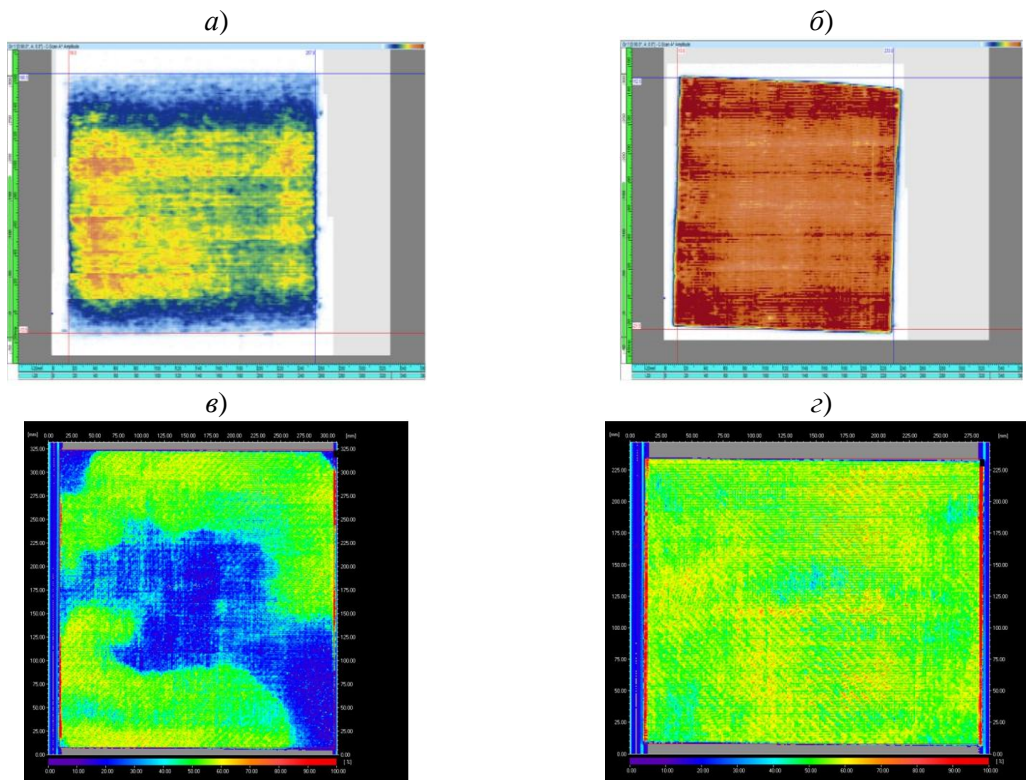


Рис. 1. *C*-сканы по донному эхо-сигналу плит из углепластика, отформованных по вакуумно-препреговой (*а*, *б*) и автоклавной технологиям (*в*, *з*) с нарушением сборки пакета и по неоптимальному режиму (*а*, *в*), а также с соблюдением операции сборки и по оптимальному режиму (*б*, *з*)

Как видно из результатов, представленных на рис. 1, *а, б*, при неверно подобранном режиме формования, а также при различных нарушениях сборки пакета перед формованием могут появляться зоны с различными несплошностями, в основном в виде повышенной пористости, что в свою очередь приводит к снижению амплитуды донных эхо-сигналов в этих зонах. При оптимальном режиме формования образцы формируются с допустимой величиной пористости, равномерной по всей площади формируемой плиты, и на *С*-скане амплитуда донных эхо-сигналов при этом практически равномерная по всей площади.

Пример неверно подобранного режима, приводящего к увеличению пористости в образце из углепластика, представлен на рис. 1, *в, г*. В данном случае формование осуществляли по автоклавной технологии. Для проведения исследований использовали автоматизированную ультразвуковую установку ScanMaster LS-500 с фокусированным ультразвуковым иммерсионным преобразователем с рабочей частотой 5 МГц. На рис. 1, *в* видно, что из-за неверно подобранного режима в плите образовались зоны с повышенной пористостью (синего цвета).

К появлению зон с повышенной пористостью в изготавливаемых плитах даже в случае соблюдения всех оптимальных условий формования (сборки пакета и режима формования) также может привести использование некачественного препрега, что тоже может быть зафиксировано при проведении ультразвукового НК.

Ультразвуковой контроль углепластиков перед проведением испытаний

При разработке новых марок углепластиков с целью определения их физико-механических характеристик проводят большое количество механических испытаний, поэтому очень важно перед их проведением убедиться в отсутствии различных видов несплошностей в испытываемых образцах, которые могут оказать существенное влияние на результат испытаний. Для этого осуществляют НК заготовок (плит) перед их резкой на образцы. В этом случае контроль проводят по разработанной технологии с использованием специальных настроечных образцов с контрольными отражателями, характеризующими чувствительность контроля. Для контроля используют ультразвуковые дефектоскопы с одноэлементными преобразователями либо линейными фазированными решетками. Для повышения чувствительности и разрешающей способности применяют фокусированные ультразвуковые преобразователи, в случае с фазированной решеткой используют аппаратную фокусировку.

На рис. 2 показано обнаружение небольших дефектов (размером 14 и 36 мм²) типа расслоений, которые в зависимости от вида испытаний могут оказать влияние на результат. Исследования проведены с использованием дефектоскопа OmniScan MX, ультразвуковой линейной фазированной решетки Olympus NDT 5L-64-NW1 с рабочей частотой 5 МГц.

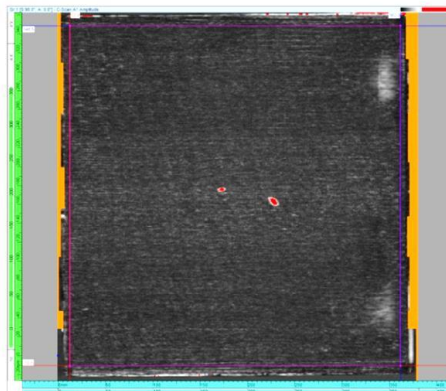


Рис. 2. *С*-скан плиты из углепластика с дефектами размером 14 и 36 мм²

Чем меньше образец для испытания, тем более жесткие требования предъявляют к минимальным допустимым дефектам в этих образцах. С помощью ультразвукового контроля в некоторых углепластиковых образцах удается достичь его чувствительности, эквивалентной выявлению плоскодонного отражателя диаметром 2 мм.

Типичными дефектами, которые также могут появиться в плитах после их формования и перед резкой на образцы, являются посторонние включения в виде различных технологических пленок, используемых при сборке пакета для формования. Иногда при сборке пакета просто забывают снять пленку со слоя препрега. Данный вид дефекта можно обнаружить с помощью ультразвукового метода НК. На рис. 3 приведен результат контроля плиты из углепластика толщиной 6 мм, в которой на одной из половинок слоя препрега с углом укладки 45 градусов обнаружена не снятая в процессе укладки слоев пленка.

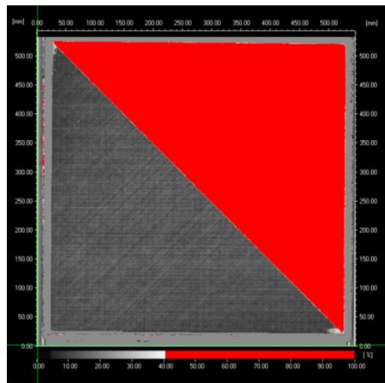


Рис. 3. C-скан плиты из углепластика с посторонним включением в виде пленки

Одним из механических испытаний при разработке новых марок углепластика является изгиб изогнутой балки. Основная сложность НК образцов для испытаний изогнутой балки заключается в контроле радиусных зон. Для контроля таких зон нашли применение секторные фазированные решетки. На рис. 4 проиллюстрировано расположение секторной фазированной решетки на панели изогнутой балки при проведении ультразвукового НК.

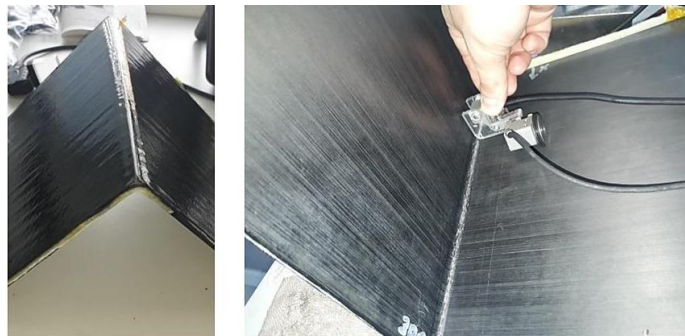


Рис. 4. Положение секторной фазированной решетки при проведении ультразвукового неразрушающего контроля радиусной зоны

Исследование панелей изогнутой балки проводили с применением дефектоскопа OmniScan MX, ультразвуковой линейной фазированной решетки Olympus NDT 5L-64-NW1 и секторной фазированной решетки 5CC10.2-16-R1 с рабочими частотами 5 МГц. При использовании секторных фазированных решеток необходимо изготавливать специальные линии задержек (призмы или локальные иммерсионные ванны) с размерами, требования к которым приведены в работе [18].

На рис. 5 представлены результаты проведения ультразвукового НК радиусной зоны панелей изогнутой балки без дефектов и с дефектами типа пустот и расслоений.

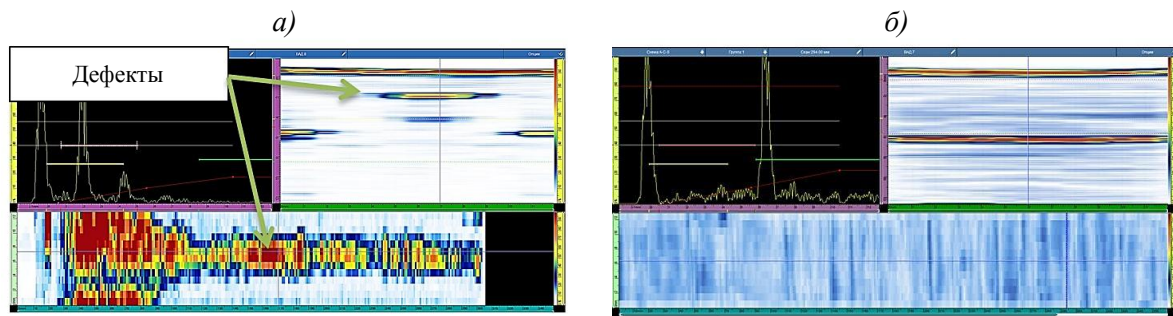


Рис. 5. Результаты проведения ультразвукового неразрушающего контроля радиусной зоны панелей изогнутой балки с дефектами типа пустот и расслоений (а), а также без дефектов (б)

Обнаружение и определение размеров разрушения образцов в процессе механических испытаний

При проведении усталостных испытаний углепластиков в некоторых случаях следует определять степень накопления микрповреждений в образцах, которые в свою очередь приводят к изменению прочностных свойств испытываемого материала.

Для оценки изменения прочностных свойств объекта контроля (определения степени накопления микрповреждений) в процессе усталостных испытаний в результате его повреждения необходимо построить зависимость между интересующей прочностной характеристикой и параметром НК. Для этого требуется записывать на образцах информативные акустические сигналы неразрушающего ультразвукового контроля в процессе усталостных испытаний, затем вычислять значения параметров неразрушающей диагностики с параллельным определением прочностных характеристик образцов, претерпевших заданное количество циклов усталостного нагружения, путем механических испытаний. Методы технической диагностики являются косвенными и основаны на установлении корреляционных связей между параметрами диагностики и физико-механическими характеристиками полимерных композиционных материалов путем сопоставления результатов неразрушающих и разрушающих испытаний. При наличии готовой корреляционной зависимости можно после предварительной записи нужного акустического сигнала и вычисления параметра диагностики оценить по построенной зависимости ту прочностную характеристику объекта контроля, для которой построена эта зависимость.

Основными микро- и макроповреждениями, образующимися в результате усталостного воздействия на образцы из полимерных композиционных материалов, являются микротрещины по границам «матрица–волокно» и микротрещины, растущие от присутствующих в образцах пор. При этом размеры повреждений не превышают 200 мкм до момента разрушения, когда микротрещины лавинообразно разрастаются и объединяются в макротрещины и расслоения. С повышением степени механического воздействия (количества циклов усталостного нагружения) в материале образцов увеличивается количество повреждений.

Применение ультразвукового эхо-импульсного метода НК можно объяснить тем, что любые нарушения структуры материала, а в особенности микротрещины, снижающие прочность, частично отражают ультразвуковые волны, увеличивая прямое рассеяние и уменьшая энергию основного фронта волн, а также увеличивают общее поглощение и рассеяние ультразвуковых волн, что в конечном итоге является информативным

параметром метода. Количественное поглощение и рассеяние оценивают параметрами диагностики, которые можно вычислить несколькими различными способами.

Исследованы образцы из углепластика размером 5×25×250 мм до и после усталостных испытаний с различным количеством циклов нагружения при максимальной амплитуде цикла 0,8 от предела прочности. Исследования проводили с использованием ультразвукового дефектоскопа OmniScan MX и ультразвуковой линейной фазированной решетки Olympus NDT 5L-64-NW1 с рабочей частотой 5 МГц. Результаты контроля эхо-импульсным методом по величине первого донного сигнала, который обратно пропорционален величине затухания, приведены в виде С-сканов по поверхности образцов на рис. 6. Можно заметить резкое падение донного сигнала с ростом числа циклов нагружения.

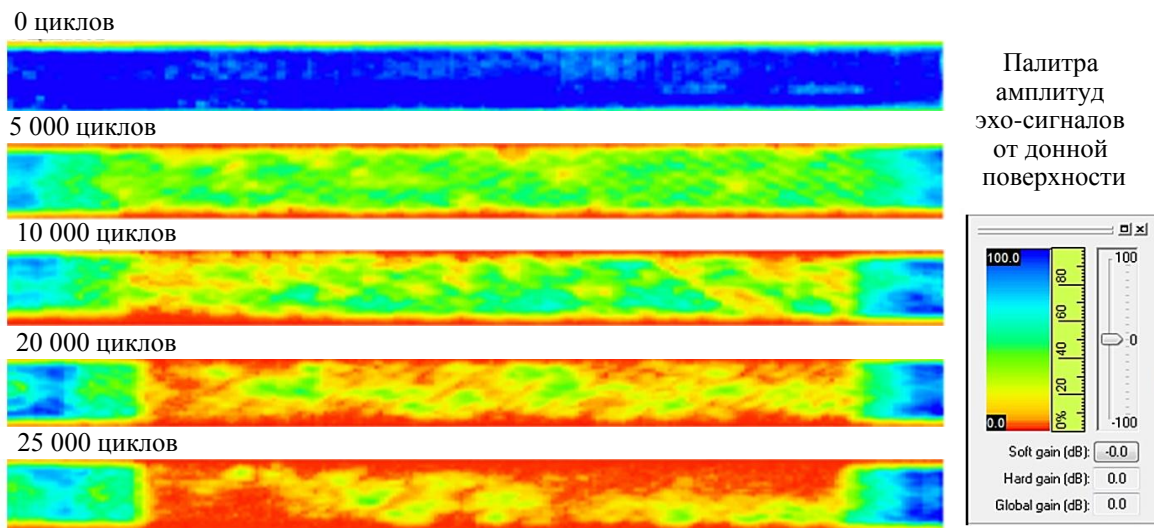


Рис. 6. С-сканы образца по донному эхо-сигналу в процессе усталостных испытаний в зависимости от количества циклов нагружения

Одним из физико-механических испытаний при разработке новых марок углепластиков является определение прочности при сжатии после удара. Данное испытание проводят в два этапа: сначала на образец оказывают ударное воздействие с использованием специального копра, после чего образец подвергают сжатию. Немаловажным является определение площади ударного повреждения после ударного воздействия – значение этого показателя впоследствии используют для определения расчетной характеристики прочности. В данном случае ультразвук является одним из оптимальных методов определения площади повреждения. Для этого, как и при контроле плоских плит после формования и перед механическими испытаниями, проводят сканирование образца по всей его площади одноэлементным преобразователем или линейной фазированной решеткой с сохранением результатов контроля и последующей обработкой данных с помощью специальных программ. Фиксирование границ повреждения осуществляют либо по отраженным сигналам от несплошностей, либо по величине амплитуды эхо-сигналов от донной поверхности образца. Для этой цели также можно использовать амплитудный теневой метод ультразвукового контроля. На рис. 7 приведены С-сканы образца из углепластика толщиной 6,5 мм после ударного воздействия. Сканирование образца осуществляли с помощью дефектоскопа OmniScan MX, ультразвуковой линейной фазированной решетки Olympus NDT 5L-64-NW1 с рабочей частотой 5 МГц и специального кодировщика для построения С-скана.

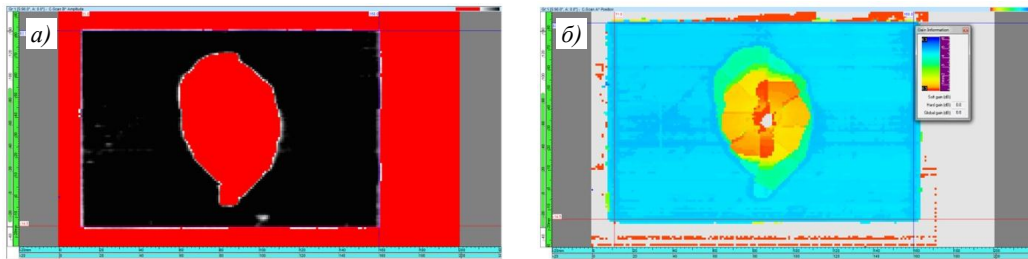


Рис. 7. С-сканы по амплитуде (а) и по глубине (б) образца из углепластика с ударным повреждением

При испытаниях на трехточечный изгиб или методом изогнутой балки происходит разрушение (расслаивание) образцов. Требуется определить размеры получаемых разрушений. Разрушения в данном случае определяют тем же методом, что и при контроле плит до проведения испытания. Небольшой сложностью при проведении контроля испытанных образцов является появление неровных участков поверхности, которые оказывают влияние на создание акустического контакта между поверхностью образца и преобразователем. На рис. 8 приведен результат ультразвукового контроля образца из углепластика после испытаний на трехточечный изгиб.

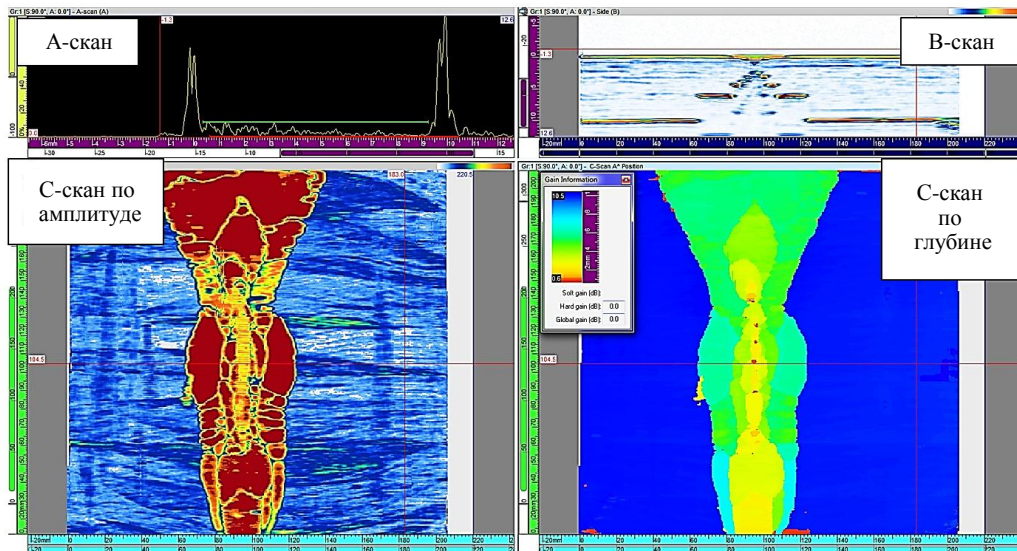


Рис. 8. Результаты проведения ультразвукового неразрушающего контроля образца из углепластика после испытаний на трехточечный изгиб

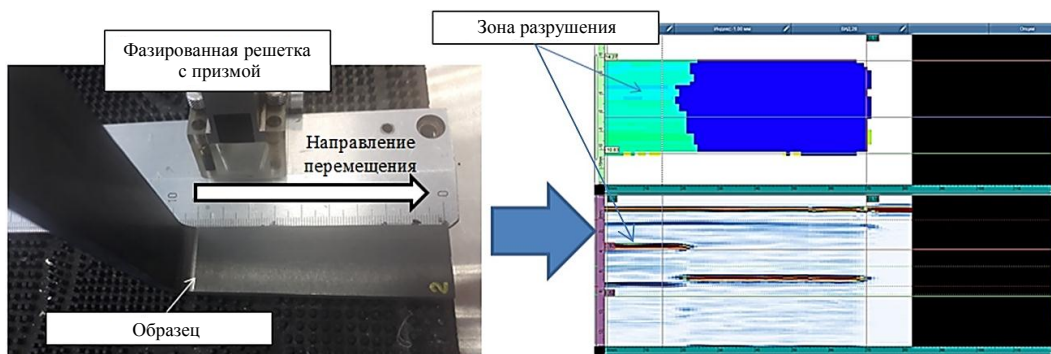


Рис. 9. Результаты проведения ультразвукового неразрушающего контроля образца из углепластика после испытаний методом изогнутой балки

На рис. 9 представлен результат ультразвукового контроля плоской части образца из углепластика после испытаний методом изогнутой балки. Контроль радиусной зоны образца осуществляют аналогично контролю панелей изогнутой балки перед их резкой на образцы для испытания (рис. 4). Радиусная зона после испытаний расслаивается полностью по ширине образца с переходом расслоения в его монолитную часть. Результат проведения ультразвукового контроля радиусной зоны образца после испытания будет аналогичным результату, показанному на рис. 5, а.

Заключения

Приведенные в данной статье результаты ультразвуковых исследований образцов из углепластика – от разработки до изготовления опытной партии – показывают важное значение НК. Для проведения НК монолитных образцов при разработке новых марок углепластиков хорошо подходит ультразвуковой эхо-импульсный метод. При выборе режимов формования метод позволяет находить аномальные зоны в отформованных плитах и скорректировать режим, перед проведением испытаний находить дефектные зоны и исключать их из испытаний, а при проведении испытаний определять состояние материала (степень поврежденности) и оценивать размеры поврежденных участков образцов. Чувствительность контроля углепластиков может достигать 2 мм в зависимости от акустических свойств материала.

Следует отметить, что, несмотря на хорошую эффективность ультразвукового эхо-импульсного метода при контроле монолитных изделий из углепластика, существуют углепластики с довольно большим затуханием ультразвука, а также 3D-армированные углепластики, для которых данный метод не подходит. В таких случаях необходимо применять ультразвуковой амплитудный теневой метод.

Библиографический список

1. 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.
2. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // *Крылья Родины*. 2016. № 5. С. 8–18.
3. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // *Интеллект и технологии*. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
4. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // *Крылья Родины*. 2019. № 7–8. С. 54–58.
5. Железина Г.Ф., Соловьева Н.А., Макрушин К.В., Рысин Л.С. Полимерные композиционные материалы для изготовления пылезащитного устройства перспективного вертолетного двигателя // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 1 (50). С. 58–63. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-58-63.
6. 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.
7. Иванов Н.В., Гуревич Я.М., Хасков М.А., Акмеев А.Р. Изучение режима отверждения связующего ВСЭ-34 и его влияния на механические свойства // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 2 (47). С. 50–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-50-55.
8. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № S. С. 7–17.
9. 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 // *Основные тенденции, направления и перспективы развития методов неразрушающего контроля в аэрокосмической отрасли: сб. трудов X Всерос. конф. «ТестМат»*. М.: ВИАМ, 2018. С. 18–31. URL: <https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1063.pdf> (дата обращения: 07.05.2021).

10. Papa I., Lopresto V., Langella A. Ultrasonic inspection of composites materials: Application to detect impact damage // *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2021. Vol. 4. Is. 1. P. 37–42. DOI: 10.1016/j.ijlmm.2020.04.002.
11. Bossi R.H., Georgeson G.E. Nondestructive testing of aerospace composites // *Polymer Composites in the Aerospace Industry*. Second Edition. 2020. P. 461–489. DOI: 10.1016/B978-0-08-102679-3.00016-2.
12. 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.
13. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2004. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. 864 с.
14. Косарина Е.И., Степанов А.В. Радиографический контроль сотовых конструкций // *В мире неразрушающего контроля*. 2003. № 3. С. 12–15.
15. Бойцов Б.В., Васильев С.Л., Громашев А.Г. Методы неразрушающего контроля, применяемые для конструкций из перспективных композиционных материалов // *Труды МАИ*. 2011. № 49. С. 63–74.
16. Троицкий В.А., Карманов М.Н., Троицкая Н.В. Неразрушающий контроль качества композиционных материалов // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2014. № 3. С. 29–33.
17. Диков И.А., Бойчук А.С., Далин М.А., Чертишев В.Ю., Генералов А.С. Связь прочностных характеристик, пористости и данных ультразвукового контроля для образцов из ПКМ, полученных по автоклавной и инфузионной технологиям // *Контроль. Диагностика*. 2018. № 11. С. 40–51.
18. Бойчук А.С. Разработка технологий неразрушающего контроля монолитных конструкций из углепластика с использованием ультразвуковых антенных решеток: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 203 с.