

ДИАГНОСТИКА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ РЕВЕРБЕРАЦИОННО-СКВОЗНЫМ МЕТОДОМ

Рассмотрены физические основы реверберационно-сквозного метода диагностики полимерных композитов и область его применения. Проведен анализ существующих способов вычисления количественного критерия данного метода диагностики и дано описание принципиально нового способа, разработанного в ВИАМ.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, реверберационно-сквозной метод, акустическая эмиссия, физико-механические характеристики, дефекты структуры, критерий «stress wave factor» (SWF).

POLYMER COMPOSITE DIAGNOSTICS BY THE ULTRASONIC REVERBERATIVE-THROUGH METHOD

The physical bases of the reverberative-through diagnostic method were considered for polymer composites and their application fields. The analysis of available ways for calculating the quantitative criterion of this diagnostic method was carried out and the description of the principally new method, developed in VIAM was presented.

Keywords: polymer composite materials, reverberative-through method, acoustic emission, physico-mechanical characteristics, structural defects, stress wave factor (SWF) criterion

¹ Федеральное 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

Методы технической диагностики являются косвенными и основаны на установлении корреляционных связей между параметрами диагностики и физико-механическими характеристиками полимерных композиционных материалов (ПКМ) путем сопоставления результатов неразрушающих и разрушающих испытаний. Для оценки прочности ПКМ с различной ориентацией армирующих волокон наиболее эффективен реверберационно-сквозной метод [1–5].

Благодаря многократному прохождению УЗ-импульсов через объект контроля (ОК), возможно обнаружение не выявляемых традиционными методами многочисленных мелких дефектов, влияющих на эксплуатационные свойства материала, – пористость, микротрещины, начальные стадии усталостных разрушений и т. п. Контроль реверберационно-сквозным (РСкв) методом следует проводить после проверки ОК другими методами на наличие крупных дефектов.

РСкв-метод реализуется при одностороннем или двухстороннем доступе к ОК при расстоянии между осями преобразователей порядка нескольких сантиметров, что выгодно отличает этот метод от метода отражения, когда ОК прозвучивается по толщине. Если для определения некоторых физических характеристик материала применение метода отражения оправдано (высокая локальность измеряемой характеристики, приемлемая погрешность измерений), то использование реверберационно-сквозного метода позволяет получить более высокую точность оценки упругих и прочностных

характеристик материала, пусть и с меньшей локальностью. Подобно другим интегральным методам РСкв-метод не позволяет точно определить координаты выявленных дефектов или определенных характеристик материалов. Метод дает только усредненные данные о состоянии зоны ОК, расположенной между излучающим и приемным преобразователями.

РСкв-метод широко применяется за рубежом, однако в России он не нашел должного применения. Этот метод позволяет оценивать пористость материала, выявлять трещины в полимерной матрице, отсутствие ее соединения с армирующими волокнами, разрывы волокон, микрорасслоения и т. п., т. е. такие структурные неоднородности, которые определяют физико-механические характеристики материала, и в то же время влияют на поглощение и рассеяние ультразвука. Количественно затухание оценивается критерием, который в иностранной литературе называют *stress wave factor* (SWF).

Существуют многочисленные способы вычисления критерия SWF: амплитудный (*peak voltage*), счетные (*ringdown count* и *weighted ringdown count*), энергетические (*energy integral* и *power spectrum*), спектральных моментов (*spectral moments*), ультразвуковой спектроскопии (*ultrasonic spectroscopy*), анализа поля рассеяния (*diffuse field analysis*), смешанных параметров (*mixed parameters*), а также ряд дополнительных способов (сложные регрессионные, образные и гомоморфные анализы).

Амплитудный способ является наиболее простым, он реализуется так же, как и в методе акустической эмиссии, и заключается в использовании в качестве величины SWF максимальной амплитуды сигнала, прошедшего через ОК. Такой критерий подвержен влиянию случайных факторов, так как зависит от формы сигналов, не связанной с исследуемыми свойствами ОК. Счетные способы реализуются так же, как и в методе акустической эмиссии, и требуют задания порогового напряжения. Энергетические способы являются более совершенными, однако требуют задания оптимального временного или частотного интервалов. Метод спектральных моментов использует статистическую обработку параметров спектра и позволяет определить критерий SWF через отношение различных спектральных моментов. Метод ультразвуковой спектроскопии (или спектральный анализ) позволяет выделить те спектральные компоненты, на которые интересующий параметр ОК влияет наиболее сильно, исключив из рассмотрения остальные. Благодаря этому повышается точность определения критерия SWF. Анализ поля рассеяния используется для случаев, в которых из-за многочисленных волновых взаимодействий, рассеяния и стохастических взаимодействий теряется вся фазовая информация. Чаще всего этот способ применяется совместно с энергетическим способом (*power spectrum*). Способ смешанных параметров включает измерение скорости и затухания для вычисления SWF.

Все вышеперечисленные способы имеют свои области применения, а также достоинства и недостатки. Выбор того или иного способа зависит главным образом от особенностей ОК и его свойств, которые необходимо определить. Амплитудный способ применяют для обнаружения микротрещин в элементах конструкций из ПКМ, подвергнутых растягивающим нагрузкам; счетные способы – для определения разрушающих напряжений и межслоевой прочности (*ringdown count*), а также для выявления повреждений ПКМ от удара и прочности клеевых соединений (*weighted ringdown count*); энергетические способы – для обнаружения усталостных повреждений и т. д.

Во ФГУП «ВИАМ» разработан принципиально новый способ вычисления критерия SWF, являющегося параметром диагностики при определении прочностных характеристик и степени поврежденности элементов конструкций из ПКМ. Способ позволяет учесть смоделированные на образцах-свидетелях изменения структуры материала в результате повреждающих воздействий и отстроиться от информации, не связанной с состоянием структуры (например, от информации, определяемой конструктив-

ными особенностями ОК), путем вычисления акустической характеристики повреждения материала, которая была названа «спектральной весовой функцией».

Для практической реализации способа необходимо совместно с элементом конструкции изготовить образцы-свидетели из углепластика (схема выкладки $[0^\circ/90^\circ]$, толщина 10 мм), имитирующие те зоны (по толщине, кривизне поверхности, схеме выкладки и т. д.), в которых предполагается осуществлять контроль РСкв-методом с помощью УЗ-преобразователей (частота 1 МГц), расположенных на расстоянии 134 мм друг от друга. Затем составить карту точек расположения пары преобразователей на элементе конструкции и на образцах-свидетелях и записать РСкв-сигналы ($U_{0i}(t)$ и $U_{1j}(t)$ соответственно) в этих точках (рис. 1, а, б). Далее образцы необходимо подвергнуть различным повреждающим воздействиям (механическим, тепловым и др.), имитирующим эксплуатационные нагрузки. Желательно добиться максимально допустимого (докритического) поврежденного состояния. После этого, согласно составленной ранее карте, снова записать прошедшие в образцах РСкв-сигналы $U_{2j}(t)$ (рис. 1, в, з). Используя исходные сигналы в образцах и сигналы, записанные после повреждающих воздействий в этих же образцах, для каждого вида повреждающего воздействия вычислить усредненную спектральную весовую функцию W :

$$W(f) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n [s_{1j}(f) - s_{2j}(f)], \quad (1)$$

где $s_{1j}(f)$ и $s_{2j}(f)$ – амплитудные спектры сигналов $U_{1j}(t)$ и $U_{2j}(t)$, записанных с образцов в исходном состоянии и после повреждающего воздействия соответственно; n – количество измерений.

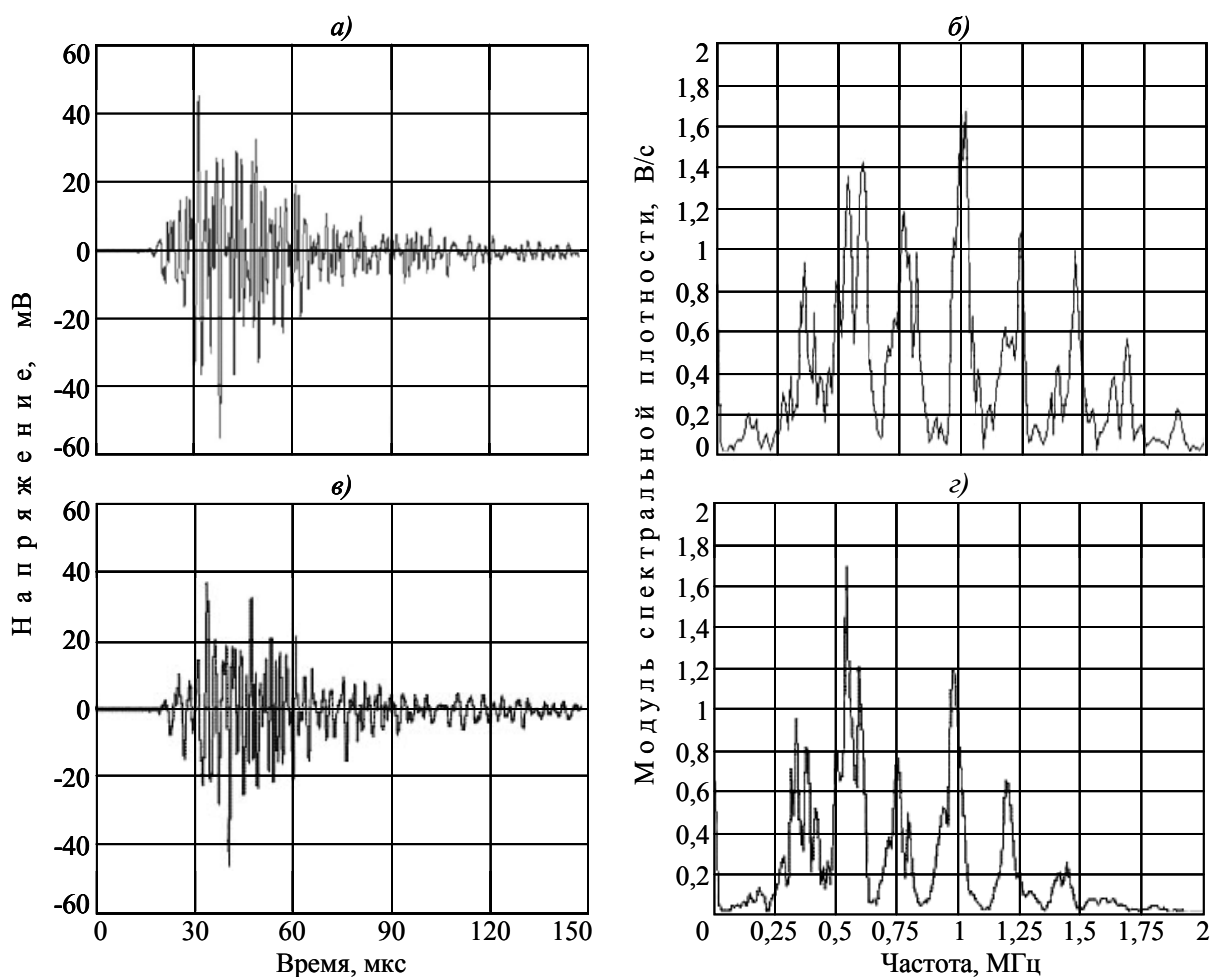


Рис. 1. РСкв-сигналы (а, в) и их амплитудные спектры (б, з) с образцов-свидетелей из углепластика в исходном состоянии (а, б) и с нанесенными повреждениями (в, з)

Физический смысл такой функции заключается в том, что она будет положительна в области тех спектральных составляющих, которые преобладали в сигналах с образца до повреждения, и отрицательна в области тех спектральных составляющих, которые появились в сигналах после повреждения образца (рис. 2). Таким образом, она содержит информацию об изменениях спектра сигнала, вызванных изменениями структуры и, соответственно, физико-механических свойств материала.

Для того чтобы определить техническое состояние элемента конструкции в процессе эксплуатации, т. е. после наработки ресурса, в процессе технического осмотра или ремонта изделия с элемента конструкции согласно составленной ранее карте снова записываются РСкв-сигналы $U_i(t)$. Используя исходные сигналы с элемента конструкции и сигналы, записанные после N циклов полета, величины SWF_i для этого случая вычисляются так:

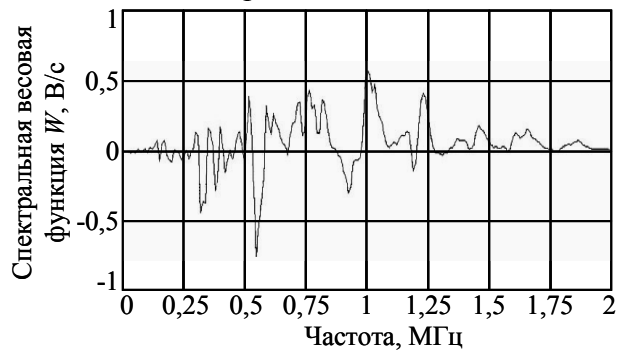


Рис. 2. Усредненная спектральная весовая функция W

$$SWF_i = \int_0^{f_d/2} [s_{0i}(f) - s_i(f)] \cdot W(f) df, \quad (2)$$

где $s_{0i}(f)$ и $s_i(f)$ — амплитудные спектры сигналов $U_{0i}(t)$ и $U_i(t)$, записанных с элемента конструкции в исходном состоянии и после N циклов полетов соответственно; W — спектральная весовая функция; f_d — частота дискретизации записанного сигнала.

Если разница спектров, полученных с одной точки исследуемой конструкции до и после эксплуатации, становится положительной или отрицательной при тех же значениях частот, что и весовая функция, построенная по результатам исследования образца, то это свидетельствует о повреждениях, аналогичных повреждениям образца, которые получены конструкцией под воздействием эксплуатационных факторов. В этом случае подынтегральное выражение $(s_0 - s) \cdot W$ будет положительным, а вычисленная величина SWF_i — тем больше, чем более схожи изменения спектра в исследуемой конструкции и в образце.

Если же спектр сигналов с конструкции изменился незначительно, или изменения не соответствуют по форме изменению, произошедшему с образцом после его повреждения, величина SWF_i будет близка к нулю. Таким образом, полученное значение критерия SWF_i характеризует степень поврежденности материала в зоне между преобразователями при записи сигнала $U_i(t)$.

Вычисленные значения SWF сравниваются с заранее выбранными пороговыми значениями SWF_{max} , которые соответствуют критической поврежденности элемента конструкции. В качестве порогового значения SWF_{max} может быть использована величина

$$SWF_{max} = \int_0^{f_d/2} W^2(f) df, \quad (3)$$

где W — спектральная весовая функция; f_d — частота дискретизации записанного сигнала.

Если в одной или нескольких точках выполнится условие $SWF_i > SWF_{max}$, принимается решение о замене элемента конструкции.

Оценка прочностных свойств элементов конструкции из ПКМ может осуществляться по заранее построенным корреляционным кривым (зависимостям значений критерия SWF от прочностных характеристик). Построение корреляционных кривых осуществляется следующим образом: элементы конструкции или фрагменты элементов конструкции (если это невозможно или затруднительно, то для этих целей можно использовать конструктивно-подобные образцы) с разной степенью поврежденности размечают в соответствии с размерами образцов под механические испытания, маркируют, записывают РСкв-сигналы и по формуле (2) вычисляют для каждого такого образца значение критерия SWF. Спектральная весовая функция при этом вычисляется с использованием амплитудных спектров сигналов, записанных на наименее и наиболее поврежденных элементах конструкции или фрагментах. Затем их разрезают на образцы и проводят механические испытания. После этого строят графики связей значений критерия SWF с соответствующими им прочностными характеристиками. Используя эти связи, возможно вычислить снижение прочности элемента конструкции, на основании чего разработчик изделия может оценить более обоснованно состояние этого элемента конструкции и возможность его дальнейшей эксплуатации.

Авторами проведены экспериментальные исследования эксплуатационных возможностей ультразвукового РСкв-метода при диагностике углепластиков, подвергавшихся различным температурным и механическим нагрузкам. В процессе испытаний определялись параметры диагностики (критерии SWF) и прочностные характеристики материала. Рассматриваемый метод позволяет оценить степень повреждения структуры материала микродефектами, от наличия которых зависят прочностные характеристики полимерного композита. По результатам проведенного анализа экспериментальных данных можно сделать вывод о перспективности применения ультразвукового реверберационно-сквозного метода для диагностики углепластиков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Неразрушающий контроль: Справочник в 7-и томах /Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль /И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. М.: Машиностроение, 2004. С. 136–137, 287–289, 508–509, 759, 776.
2. Non-destructive testing of fiber-reinforced plastics composites. Summerscales John., Elsevier Science Publishers LTD. 1990. V. 2. P. 1–47.
3. ASTM Standard E 1495-02. Standard Guide for Acousto-Ultrasonic Assessment of Composites, Laminates and Bonded Joints.
4. ASTM Standard E 1736-05. Standard Practice for Acousto-Ultrasonic Assessment of Filament-Wound Pressure Vessels.
5. Nondestructive Testing Handbook. 2-nd ed. V. 7: Ultrasonic Testing //American Society for Nondestructive Testing. 1991. P. 893.

REFERENCES LIST

1. Nerazrushajushhij kontrol' [Non-destructive inspection]: Spravochnik v 7-i tomah /Pod obshh. red. V.V. Kljueva. T. 3: Ul'trazvukovoj kontrol' /I.N. Ermolov, Ju.V. Lange. M.: Mashinostroenie, 2004. S. 136–137, 287–289, 508–509, 759, 776.
2. Non-destructive testing of fiber-reinforced plastics composites. Summerscales John., Elsevier Science Publishers LTD. 1990. V. 2. P. 1–47.
3. ASTM Standard E 1495-02. Standard Guide for Acousto-Ultrasonic Assessment of Composites, Laminates and Bonded Joints.
4. ASTM Standard E 1736-05. Standard Practice for Acousto-Ultrasonic Assessment of Filament-Wound Pressure Vessels.
5. Nondestructive Testing Handbook. 2-nd ed. V. 7: Ultrasonic Testing //American Society for Nondestructive Testing. 1991. P. 893.