

Научная статья

УДК 691.666.1-9

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-63-71

ИССЛЕДОВАНИЕ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И МИКРОТВЕРДОСТИ МАТРИЦЫ В ОБРАЗЦАХ ИЗ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО УГЛЕПЛАСТИКА

Е.А. Вешкин¹, В.В. Семенычев¹, С.Г. Кирилин¹, С.Е. Истягин¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Образцы из листа углепластика толщиной 1,5 мм с различными режимами отверждения нагружали по схеме консольного изгиба в упругой области. Датчик акустической эмиссии крепили к образцу в зоне максимальных изгибающих моментов, а акустические сигналы, полученные в период нагружения образцов, регистрировали с помощью осциллографа с программным обеспечением. Зарегистрированные сигналы акустической эмиссии анализировали и с учетом значений микротвердости матрицы, полученных при различных режимах формования, строили соответствующие зависимости.

Ключевые слова: углепластик, режимы отверждения, акустическая эмиссия, микроскопические исследования, микротвердость

Для цитирования: Вешкин Е.А., Семенычев В.В., Кирилин С.Г., Истягин С.Е. Исследование сигналов акустической эмиссии и микротвердости матрицы в образцах из однонаправленного углепластика // Труды ВИАМ. 2023. № 6 (124). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-63-71.

Scientific article

INVESTIGATION OF ACOUSTIC EMISSION SIGNALS AND MICROHARDNESS OF THE MATRIX IN THE SAMPLES FROM UNIDIRECTIONAL CARBON FIBER

E.A. Veshkin¹, V.V. Semenychev¹, S.G. Kirillin¹, S.E. Istyagin¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Samples of 1.5 mm thick carbon fiber-reinforced plastic sheet with different curing modes were loaded according to the scheme of cantilever bending in the elastic region. The acoustic emission sensor was attached to the specimen in the zone of maximum bending moments, and the acoustic signals obtained during sample loading were recorded using an oscilloscope with software. The recorded acoustic emission signals were analyzed and, taking into account the values of microhardness of the matrix obtained at different molding modes, the corresponding dependences were plotted.

Keywords: carbon fiber-reinforced plastic, curing modes, acoustic emission, microscopic studies, microhardness

For citation: Veshkin E.A., Semenychev V.V., Kirillin S.G., Istyagin S.E. Investigation of acoustic emission signals and matrix microhardness of the matrix in samples from unidirectional carbon fiber. *Trudy VIAM*, 2023, no. 6 (124), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-63-71.

Введение

В соответствии с классификацией, описанной в ГОСТ 56542–2015, акустико-эмиссионный контроль – это пассивный ультразвуковой метод [1]. Назначение данного метода – фиксация и анализ упругих и переходных волн, которые появляются в структуре материала вследствие изменения напряженного состояния, деформации конструкции и т. д. Акустическая эмиссия представляет собой возбуждение волн напряжений, вызванных резкой перестройкой молекул в структуре того или иного материала. Классическим источником акустической эмиссии является рост и возникновение дефектов типа несплошностей в процессе деформации материала. Отличие метода акустической эмиссии от распространенных в настоящее время ультразвуковых методов заключается в том, что он является пассивным, а не активным, т. е. источником акустических волн является не отраженный от дефектов различного рода, возбуждаемый передатчиком или бесконтактно импульс, а развивающиеся дефекты внутри материала [2]. Такие дефекты наиболее опасны, так как значительно снижают эксплуатационные характеристики и критичны для конструкций. Особенно это относится к высокоответственным и высоконагруженным деталям, работающим в динамически напряженном состоянии. Учитывая тот факт, что в последнее время широкое распространение получили полимерные композиционные материалы (ПКМ), наполнителями в которых могут быть самые разнообразные волокна и ткани, появились работы, посвященные изучению сигналов акустической эмиссии в образцах из композитов при их аксиальном нагружении [3]. Метод акустической эмиссии основан на анализе измеряемых параметров упругих эмиссионных волн, а также на явлении зарождения и распространения упругих колебаний (акустических волн) в различных процессах. Звуковые волны всегда исходят от источника их возникновения к преобразователям акустической эмиссии, в которых они преобразовываются в электрические сигналы, поступающие в систему для последующей обработки и анализа данных [4].

Очевидно, что в настоящее время не существует оптимального метода неразрушающего контроля (НК) для конструкций и потребностей любого уровня. Метод акустической эмиссии по многим аспектам менее трудозатратный по сравнению с большинством методов НК. Например, при данном методе отсутствует необходимость контроля всей поверхности детали, осуществляется более быстрая локализация развивающихся дефектов с помощью сетки приемных датчиков [5]. Однако метод акустической эмиссии не дает информации о геометрической форме дефектов, а лишь указывает на их развитие и положение в теле детали [6]. В прогрессивные комплексные методики проведения НК деталей и конструкций включены несколько видов или типов методов НК.

Так, метод акустической эмиссии служит для локализации и определения дефектов во всей конструкции, а другие методы НК (ультразвуковые, магнитные, вихретоковые и др.) обеспечивают их точное геометрическое определение [7]. Такое сочетание методов НК устраняет недостатки одиночных методов и способствует сокращению трудоемкости контроля и одновременно увеличению его производительности. Метод акустической эмиссии также успешно применяется для определения остаточного ресурса, ремонтпригодности и общего износа деталей и конструкций, так как позволяет определить – в каких местах возникли дефекты в процессе эксплуатации изделия. Это способствует совершенствованию процесса изготовления материалов нового поколения для конкретных деталей и интегральных конструкций ответственного назначения, в том числе металлических [8–11].

Анализ свойств новейших материалов и эффективности использованных наукоемких технологий, как правило, базируется на необходимости проведения научно-технических или физико-механических исследований, отличающихся высокой

информативностью результатов опытных работ [12, 13]. К данным способам изучения материалов можно отнести и такой дифференциальный метод, как оценка микротвердости матрицы композита [14], благодаря чему у экспериментатора появляется возможность извлечь дополнительную информацию об изучаемом предмете. В данной работе применяется склерометрический метод – наноидентирование. Измерение твердости методом склерометрии состоит в измерении геометрических параметров царапин. По сравнению с методами вдавливания, склерометрия подвержена меньшему влиянию упругого восстановления исследуемого материала, а также меньшему влиянию шероховатости и дефектов на поверхности материала за счет усреднения данных при измерении параметров царапин, тем самым повышается информативность и точность результатов.

С помощью параметра микротвердости матрицы ПКМ можно получить информацию о качестве реакции отверждения через оценку значений по толщине композита, в том числе через относительное сравнение при различных температурно-временных режимах изготовления образцов. Микротвердость определяли с помощью четырехгранной пирамиды посредством измерения площади царапины и усилия нагружения. При этом метод акустической эмиссии используется для изучения зависимости комплексных свойств системы матрица/композит при различных режимах изготовления.

Использование подобных структурных способов изучения позволяет оценить не только характеристики материала в какой-либо точке [15], но и их изменение в объеме [16] или при оценке анизотропии свойств [17].

Резюмируя изложенное, необходимо акцентировать внимание на том, что любые новейшие научно-технические разработки для производства деталей или полуфабрикатов [18] всегда требуют многосторонней оценки характеристик полученного материала [19], поэтому использование нескольких способов изучения параметров материала [20], как правило, приводит к получению более объективной информации [21].

Работа осуществлена в рамках реализации комплексного научного направления 13.1. «Связующие для полимерных и композиционных материалов конструкционного и специального назначения» при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Материалы и методы

В качестве объекта исследований изучены образцы из однонаправленного углепластика на основе эпоксидной смолы ВСЭ-1212. Для получения толщины образцов, равной 1,5 мм, использованы семь слоев препрега.

Выбрана схема нагружения образцов в виде консольной балки, исходя из того, что при данном виде нагружения максимальные значения изгибающего момента находятся в месте жесткой заделки образца, где легко крепить акустико-эмиссионную антенну, а также удобно измерять стрелу прогиба. На рис. 1 показана схема нагружения консольного образца номинальной длины 300 мм и ширины 30 мм. Нагрузка на консоли образцов составляла 10 Н.

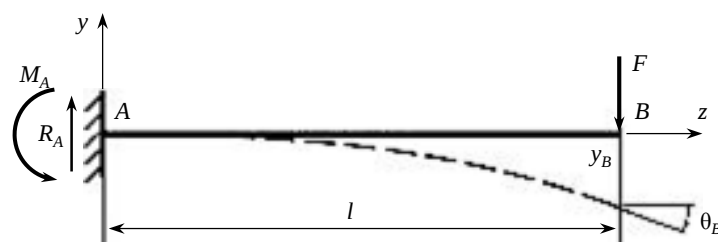


Рис. 1. Схема нагружения образцов

Образцы из однонаправленного углепластика формовали по режимам, указанным в табл. 1, в которой также приведены сведения об измеренных значениях микротвердости матрицы на лицевой поверхности образцов. Результаты измерений представляют собой средние арифметические значения по 15 образцам для каждой партии. За партию приняты образцы, отформованные по одному режиму и вырезанные из одной панели.

Таблица 1

**Режимы формования образцов и микротвердость матрицы
на лицевой поверхности образцов**

Режим формования (номер партии образцов)	135 °С, 2 ч (1)	150 °С, 2 ч (2)	165 °С, 2 ч (3)	180 °С, 2 ч (4)	180 °С, 3 ч (5)
Микротвердость, МПа	435	546	640	744	865

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлена графическая интерпретация сведений, приведенных в табл. 1. Полученная кривая характеризует изменение значений микротвердости матрицы на поверхности образцов углепластика толщиной 1,5 мм, отформованных по различным режимам.

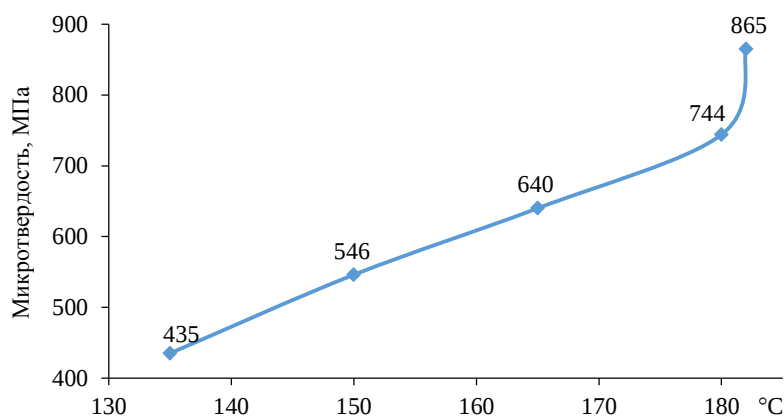


Рис. 2. Зависимость микротвердости от температуры формования

Как видно из представленной на рис. 2 зависимости, значения микротвердости матрицы на лицевой стороне образцов однонаправленного углепластика увеличиваются с ростом температуры формования образцов. Так, минимальной температуре формования, равной 135 °С, соответствует и минимальная микротвердость матрицы, равная 435 МПа, а максимальной температуре и длительности формования (180 °С, 3 ч) соответствует и максимальное значение микротвердости 865 МПа.

На рис. 3 показан график изменения стрелы прогиба однонаправленных образцов из углепластиков при их консольном нагружении в зависимости от значений микротвердости матрицы на лицевой поверхности образцов, где различные значения микротвердости матрицы получены в результате формования образцов при различных температурных режимах. Видно, что с ростом микротвердости матрицы стрела прогиба образца монотонно уменьшается, это, в свою очередь, означает увеличение упруго-прочностных свойств системы матрица/наполнитель. В любом композите баланс упругости и твердости имеет важное значение, но существует некоторое предельное значение микротвердости матрицы (конкретное для каждой системы матрица/наполнитель), после которого стрела прогиба не только перестанет уменьшаться, но и может увеличиваться при определенных нагрузках. В этом случае матрица становится излишне хрупкой и теряет способность эффективно воспринимать и распределять внутренние напряжения при взаимодействии с наполнителем.

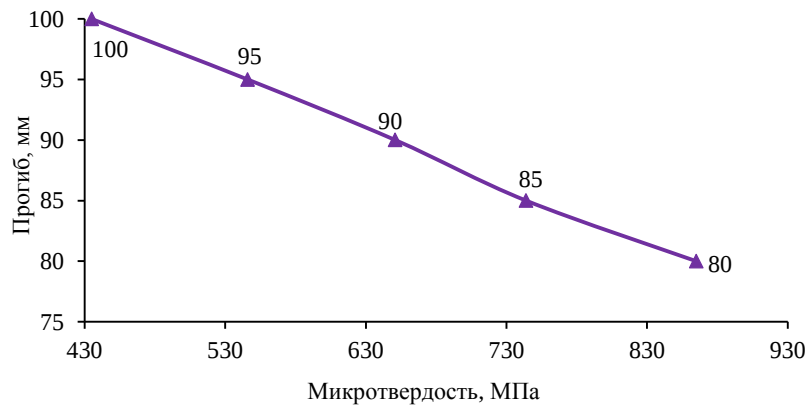


Рис. 3. Зависимость прогиба однонаправленных образцов из углепластиков от микротвердости матрицы на лицевой поверхности

Видно также, что стрела прогиба образцов с повышением микротвердости матрицы плавно снижается со 100 до 80 мм и фактически представляет собой прямую линию.

В качестве примера для образцов, отвержденных при температуре 135 °С в течение 2 ч, на рис. 4 показаны записанные при их деформации сигналы акустической эмиссии. Так, на рис. 4, а показаны частота и длительность сигналов акустической эмиссии, полученные при деформации образцов по методу консольного изгиба. Видно, что частота акустического сигнала составила 184 Гц, а его длительность равна 5450 мкс. На рис. 4, б показана амплитуда сигнала акустической эмиссии, которая составила 0,77 В. На каждой осциллограмме в правом верхнем углу показаны компьютерные данные измеряемых величин, которые включали в сводную таблицу результатов измерения сигналов акустической эмиссии.

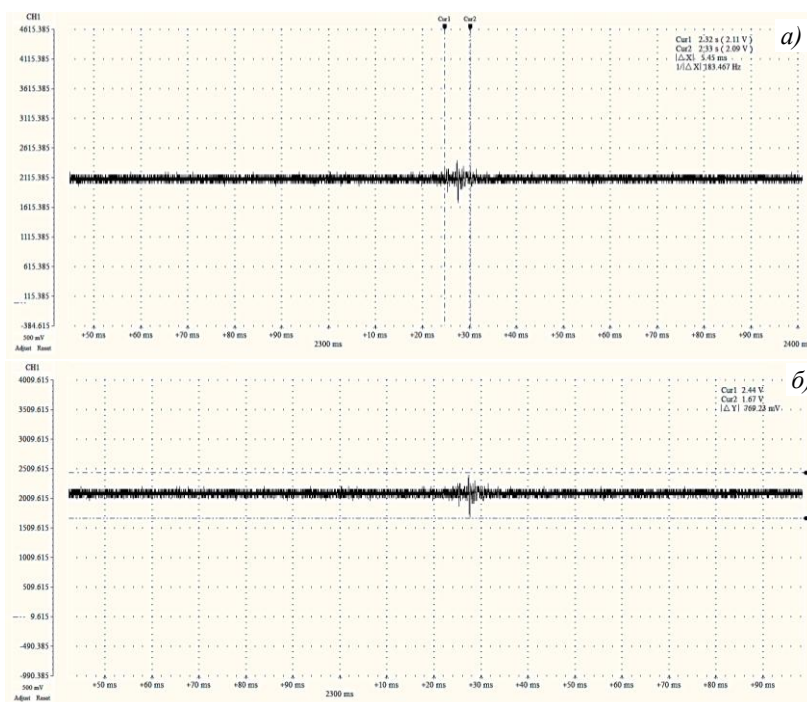


Рис. 4. Частота и длительность (а), а также амплитуда (б) сигналов акустической эмиссии в образце партии 1, отформованной по режиму при 135 °С, 2 ч

Естественно, что в данном случае необязательно приводить все 10 осциллограмм сигналов акустической эмиссии по образцам с каждым режимом формования, а вполне достаточно приведенных примеров, которые полностью характеризуют их вид.

В табл. 2 сведены результаты акустических измерений образцов, отвержденных по приведенным режимам формования.

Таблица 2

Результаты акустических измерений однонаправленных образцов из углепластиков толщиной 1,5 мм

Режим формования	1	2	3	4	5
Амплитуда, В	0,77	1,2	1,96	2,54	2,67
Частота, Гц	184	995	1615	2001	2118
Длительность, мкс	5450	4842	4503	4344	4270

По результатам, приведенным в табл. 1 и 2, построены графические зависимости изменения частоты, амплитуды и длительности акустических сигналов от микротвердости матрицы.

На рис. 5, а показана зависимость частоты акустических сигналов от микротвердости матрицы. Видно, что увеличение микротвердости матрицы приводит к росту частоты акустических сигналов по приведенной графической зависимости. Следует отметить, что рост значений частоты акустических сигналов сначала резко возрастает, а начиная со значений микротвердости порядка 750 МПа резко замедляется. На рис. 5, б показано изменение амплитуды сигналов акустической эмиссии в зависимости от величины микротвердости матрицы. Приведенный график свидетельствует о росте амплитуды сигналов акустической эмиссии с увеличением микротвердости матрицы. Видно, что изменение амплитуды при низких значениях микротвердости происходит быстро, а при высоких значениях замедляется.

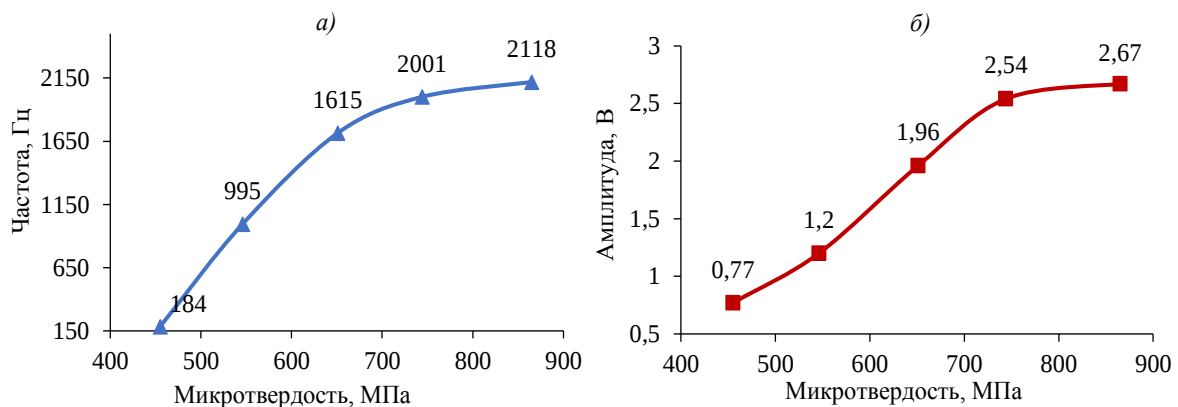


Рис. 5. Зависимость частоты (а) и амплитуды (б) акустических сигналов от микротвердости матрицы

На рис. 6 показана графическая зависимость изменения длительности акустического сигнала от микротвердости матрицы. Видно, что с ростом микротвердости матрицы длительность акустического сигнала при деформации образца снижается, т. е. относительно частоты и амплитуды сигнала акустической эмиссии наблюдается обратная зависимость.

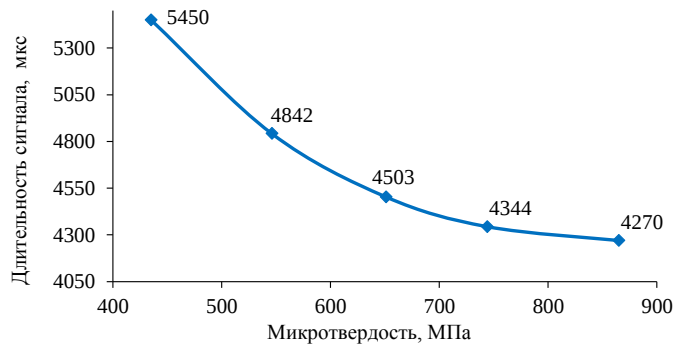


Рис. 6. Изменение длительности акустического сигнала в зависимости от микротвердости матрицы

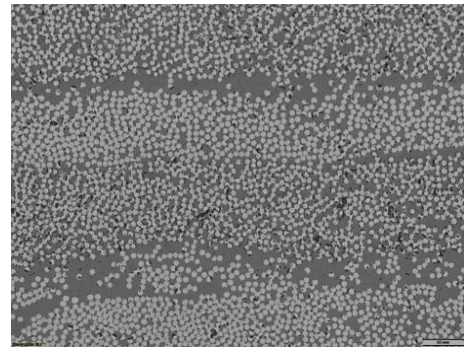


Рис. 7. Типичная структура однонаправленного углепластика

На рис. 7 показана типичная структура (поперечный шлиф), сформированная в однонаправленном углепластике толщиной 1,5 мм. Видно, что все углеродные волокна расположены перпендикулярно к плоскости шлифа; хорошо видны участки, состоящие только из матрицы. При внимательном рассмотрении рис. 7 можно заметить стыковочные зоны углелент наполнителя.

Заключения

Проведен комплекс исследований на 75 образцах из однонаправленного углепластика на основе эпоксидной смолы ВСЭ-1212 толщиной 1,5 мм длиной 300 мм и шириной 30 мм, отформованных при температурах от 135 до 180 °С с временем выдержки от 2 до 3 ч. Исследование позволило сформулировать следующие основные положения образования и распространения сигналов акустической эмиссии при деформации образцов, отвержденных по различным температурно-временным режимам:

- показано, что увеличение температуры формования образцов и длительности воздействия температуры (как в случае с образцами партии 5, где длительность формования в отличие от остальных партий составила 3 ч) ожидаемо приводит к росту значений микротвердости матрицы – с 435 до 865 МПа (98,9 %). Построена зависимость увеличения микротвердости матрицы от роста температуры формования композита;

- исследованы характеристики сигналов акустической эмиссии при деформации образцов по методу консольного изгиба, такие как амплитуда сигнала, его частота и длительность: амплитуда повышается с 0,77 до 2,67 В (346 %), частота – со 184 до 2118 Гц (1151 %). Получены соответствующие осциллограммы, характеризующие их изменения;

- проведенными исследованиями установлено, что измеренные значения амплитуды и частоты сигналов акустической эмиссии возрастают с ростом микротвердости матрицы, при этом длительность акустического сигнала уменьшается с 5450 до 4270 мкс (27,6 %); полученные эмпирические кривые свидетельствуют о неравномерном изменении перечисленных характеристик, которые стремятся к своим асимптотам.

Список источников

1. ГОСТ Р 56542–2019. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. М.: Стандартинформ, 2019. 10 с.
2. Попов А.А., Баранец А.С., Губанов Д.В., Петухов В.Л. Положительные и отрицательные стороны акустико-эмиссионного способа диагностики при проведении неразрушающего контроля оборудования // Современные научные исследования и инновации. 2016. № 4. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2016/04/67330> (дата обращения: 03.08.2022).
3. Финогенов Г.Н., Риттер Е.Г., Мухутдинов А.Г., Кириллов В.Н. Акустико-эмиссионный метод оценки поврежденности полимерных композитных материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1995. № 12. С. 47–49.
4. Носов В.В., Ямилова А.Р. Метод акустической эмиссии. СПб.: Лань, 2017. 304 с.
5. Pollock A. Metals Handbook. 9th ed. ASM International, 1989, vol. 17, pp. 278–294.

6. Чертищев В.Ю. Оценка вероятности обнаружения дефектов акустическими методами в зависимости от их размера в конструкциях из ПКМ для выходных данных контроля в виде бинарных величин // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 3 (52). С. 65–79. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-65-79.
7. Мурашов В.В. Исследование и совершенствование акустических низкочастотных методов контроля изделий из слоистых пластиков и многослойных клееных конструкций // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 4 (53). С. 87–93. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-87-93.
8. 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.
9. Гращенков Д.В. Стратегия развития неметаллических материалов, металлических композиционных материалов и теплозащиты // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.
10. Каблов Е.Н., Валуева М.И., Зеленина И.В., Хмельницкий В.В., Алексахин В.М. Углепластики на основе бензоксазиновых олигомеров – перспективные материалы // *Труды ВИАМ*. 2020. № 1 (85). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.08.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
11. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Ким М.А., Бабин А.Н. Расплавные связующие для перспективных методов изготовления ПКМ нового поколения // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № S. С. 260–265.
12. Григоренко В.Б., Морозова Л.В. Применение растровой электронной микроскопии для изучения начальных стадий разрушения // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 1 (50). С. 77–87. DOI: 10.18577/2307-9140-2018-0-1-77-87.
13. Курицына А.Д. Применение метода микротвердости для определения некоторых свойств полимерных материалов // *Методы испытания на микротвердость*. М.: Наука, 1965. С. 255–260.
14. ГОСТ 9450–76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. М.: Изд-во стандартов, 1993. 35 с.
15. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Семенычев В.В., Крашенинникова Е.В. Исследование микротвердости и склерометрических характеристик связующего УП-2227Н, отвержденного при различных режимах // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 1. С. 39–45. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-39-45.
16. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Семенычев В.В., Крашенинникова Е.В. Закономерности изменения микротвердости в объеме связующего ЭДТ-69Н, отвержденного при различных температурах // *Физика и химия обработки материалов*. 2020. № 4. С. 65–71. DOI: 10.30791/0015-3214-2020-4-65-71.
17. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Семенычев В.В., Крашенинникова Е. В. Закономерности проявления анизотропии свойств в трех взаимно перпендикулярных сечениях стеклоуглепластика // *Пластические массы*. 2020. № 5–6. С. 15–19.
18. Платонов А.А., Коган Д.И., Душин М.И. Изготовление трехмерноразмерных ПКМ методом пропитки пленочным связующим // *Пластические массы*. 2013. № 6. С. 56–61.
19. Тагер А.А. Физико-химия полимеров. М.: Научный мир, 2007. 128 с.
20. Кенуй М.Г. Быстрые статистические вычисления. Упрощенные методы оценивания и проверки: справочник. М.: Статистика, 1979. 69 с.
21. Вульф Б.К., Ромадин К.П. Авиационное материаловедение. М.: Машиностроение, 1967. 391 с.

References

1. State Standard R 56542–2019. *The control is non-destructive. Classification of types and methods*. Moscow: Standartinform, 2019, 10 p.
2. Popov A.A., Baranets A.S., Gubanov D.V., Petukhov V.L. Positive and negative aspects of the acoustic emission method of diagnostics during non-destructive testing of equipment. *Modern scientific research and innovation*, 2016, no. 4. Available at: <https://web.snauka.ru/issues/2016/04/67330> (accessed: August 03, 2022).
3. Finogenov G.N., Ritter E.G., Mukhutdinov A.G., Kirillov V.N. Acoustic-emission method for assessing the damage of polymer composite materials. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 1995, no. 12, pp. 47–49.
4. Nosov V.V., Yamilova A.R. *Acoustic emission method*. St. Petersburg: Lan, 2017, 304 p.
5. Pollock A. *Metals Handbook*. 9th ed. ASM International, 1989, vol. 17, pp. 278–294.

6. Chertishchev V.Yu. The estimation of the probability of defects detection by the acoustic methods, depending on their size in constructions from PCM for output control data in the form of binary. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3, pp. 65–79. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-65-79.
7. Murashov V.V. Research and improvement of acoustic low-frequency control methods of products from layered plastics and multilayered glued of constructions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 4 (53), pp. 87–93. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-87-93.
8. Raskutin A.E. Russian polymer composite materials of new generation, their exploitation and implementation in advanced developed constructions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
9. Grashchenkov D.V. Strategy of development of non-metallic materials, metal composite materials and heat-shielding. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.
10. Kablov E.N., Valueva M.I., I.V. Zelenina, Khmel'nik V.V., Aleksashin V.M. Carbon plastics based on benzoxazine oligomers – perspective materials. *Trudy VIAM*, 2020, no. 1, paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 04, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
11. Muhametov R.R., Ahmadiyeva K.R., Kim M.A., Babin A.N. Melt binding for perspective methods of production of PCM of new generation. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 260–265.
12. Grigorenko V.B., Morozova L.V. Application of the scanning electron microscopy for studying of initial destruction stages. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 1 (50), pp. 77–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-77-87.
13. Kuritsyna A.D. Application of the microhardness method to determine some properties of polymeric materials. *Metody ispytaniya na mikrotverdest*. Moscow: Nauka, 1965, pp. 255–260.
14. State Standard 9450–76. *Measurement of microhardness by indentation of diamond tips*. Moscow: Publishing house of standards, 1993, 35 p.
15. Veshkin E.A., Postnov V.I., Semenychev V.V., Krashenninnikova E.V. Research of microhardness and sclero-metric characteristics of the binding UP-2227N, cured by different regimes. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 1 (50), pp. 39–45. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-39-45.
16. Veshkin E.A., Postnov V.I., Semenychev V.V., Krashenninnikova E.V. Patterns of changes in microhardness in the volume of the binder EDT-69N, cured at different temperatures. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 2020, no. 4, pp. 65–71. DOI: 10.30791/0015-3214-2020-4-65-71.
17. Veshkin E.A., Postnov V.I., Semenychev V.V., Krashenninnikova E.V. Patterns of the manifestation of anisotropy of properties in three mutually perpendicular sections of glass-carbon plastic. *Plasticheskiye massy*, 2020, no. 5–6, pp. 15–19.
18. Platonov A.A., Kogan D.I., Dushin M.I. Production of three-dimensional PCM by the method of impregnation with a film binder. *Plasticheskiye massy*, 2013, no. 6, pp. 56–61.
19. Tager A.A. *Physico-chemistry of polymers*. Moscow: Scientific world, 2007, 128 p.
20. Kenuy M.G. *Fast statistical calculations. Simplified assessment and verification methods: a handbook*. Moscow: Statistika, 1979, 69 p.
21. Vulf B.K., Romadin K.P. *Aviation materials science*. Moscow: Mashinostroenie, 1967, 391 p.

Информация об авторах

Вешкин Евгений Алексеевич, начальник филиала УНТЦ, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Семенев Валентин Владимирович, главный научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Кирилин Сергей Геннадьевич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Истягин Сергей Евгеньевич, инженер-технолог 3 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Evgeny A. Veshkin, Head of USTC, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Valentin V. Semenychev, Chief Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey G. Kirilin, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey E. Istyagin, Third Category Engineer-Technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 12.08.2022; получена после доработки 13.03.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 13.03.2023.
The article was submitted 12.08.2022; received in revised form 13.03.2023; approved and accepted for publication after reviewing 13.03.2023.