

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И СКЛЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ УГЛЕПЛАСТИКОВ С РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНЬЮ ОТВЕРЖДЕНИЯ МАТРИЦЫ

© 2022

- Е. А. Вешкин** кандидат технических наук, начальник филиала;  
Ульяновский научно-технологический центр ВИАМ –  
НИЦ «Курчатовский институт»;  
[untcviam@viam.ru](mailto:untcviam@viam.ru)
- С. Е. Истягин** инженер-технолог;  
Ульяновский научно-технологический центр ВИАМ –  
НИЦ «Курчатовский институт»;  
[fratos19@mail.ru](mailto:fratos19@mail.ru)
- С. Г. Кирилин** ведущий инженер;  
Ульяновский научно-технологический центр ВИАМ –  
НИЦ «Курчатовский институт»;  
[untcviam@viam.ru](mailto:untcviam@viam.ru)
- В. В. Семенычев** кандидат технических наук, главный научный сотрудник;  
Ульяновский научно-технологический центр ВИАМ –  
НИЦ «Курчатовский институт»;  
[untcviam@viam.ru](mailto:untcviam@viam.ru)

Образцы из листа углепластика толщиной 1,6 мм с различными режимами отверждения нагружались в упругой области по схеме консольного изгиба. Акустическая эмиссия регистрировалась с помощью осциллографа. В качестве критериев, оценивающих степень отверждения матрицы, использовалась характеристика микротвёрдости, оценка которой проводилась на лицевой поверхности образцов и в его поперечном сечении на фиксированных расстояниях от лицевой поверхности. Установлены зависимости частоты, амплитуды акустических сигналов, температуры, величины прогиба и расстояния до поверхности образца от микротвёрдости матрицы. Исследования показали, что значимым критерием, оценивающим влияние режима формования углепластика, является величина микротвёрдости матрицы.

*Углепластик; режимы отверждения; микроскопические исследования; метод акустической эмиссии; склерометрия; микротвёрдость*

---

**Цитирование:** Вешкин Е.А., Истягин С.Е., Кирилин С.Г., Семенычев В.В. Применение метода акустической эмиссии и склерометрии для исследования образцов углепластиков с различной степенью отверждения матрицы // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т. 21, № 3. С. 85-95. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-3-85-95

### Введение

Согласно классификации, отражённой в ГОСТ 56542-2015, акустико-эмиссионный контроль – это пассивный акустический метод. Идея метода заключается в том, чтобы регистрировать и анализировать упругие и переходные волны, которые возникают в теле объекта в связи с изменением его структуры, например, в результате возникновения напряжённых состояний, деформаций, внешних механических воздействий и т.д. [1]. Акустическая эмиссия (АЭ) представляет собой явление генерации волн напряжений, вызванных внезапной перестройкой в структуре материала. Классическим источником акустической эмиссии является процесс деформирования, связанный с ростом дефектов, таких как трещины или зоны пластической деформации. Акустическая эмиссия является следствием подвижек среды, что позволяет использовать её для диагностики процессов и материалов, и применяется в различных областях [2 – 4].

Акустико-эмиссионный метод основан на анализе параметров упругих волн акустической эмиссии, а также на явлении возникновения и распространения упругих колебаний (акустических волн) в различных процессах. Акустические волны распространяются от источника их образования к преобразователям акустической эмиссии (ПАЭ), где преобразуются в электрические сигналы, поступающие в систему для дальнейшей обработки и анализа. Доля конструкционных полимерных композиционных материалов (ПКМ), наполнителями в которых являются разнообразные волокна и ткани, растёт, поэтому актуальными являются работы, посвящённые исследованиям сигналов акустической эмиссии в образцах из композитов [5 – 8].

Стратегическими направлениями развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года предусмотрено создание новых функциональных ПКМ с новым уровнем свойств [9; 10], при этом будут использованы самые разнообразные связующие [11]. Высокие эксплуатационные свойства ПКМ определяются совокупностью выбора связующего и наполнителя в сочетании с разработанной технологией изготовления детали или полуфабриката. При этом весьма важным является поиск путей снижения себестоимости продукции за счёт внедрения новых материалов и применения энергосберегающих технологий.

Оценка свойств новых композиционных материалов и эффективности используемых технологий, как правило, основывается на необходимости проведения технологических или материаловедческих исследований [12]. К таким исследованиям необходимо отнести и оценку микротвёрдости матрицы композита [13], благодаря чему у экспериментатора появляется возможность получить дополнительную информацию об изучаемом предмете. Применение таких методов исследования позволяет оценить не только свойства материала в какой-либо точке, но и их изменение в объёме [14; 15].

Новые технологические разработки по изготовлению деталей или полуфабрикатов требуют всесторонней оценки полученного материала, а расширение методов исследования свойств материала и применение статистических методов исследования [16] приводят к получению более объективной информации [17 – 19].

Цель настоящей работы заключается в изучении формирования сигналов акустической эмиссии в образцах из углепластика КМУ-11ТР с различными режимами формования при их деформировании по схеме консольного изгиба. Проводится оценка значений микротвёрдости матрицы композита как в высотном сечении образцов, так и по их лицевой поверхности. Предметом исследований является поиск экспериментальных закономерностей характеристик эмиссионных сигналов и микротвёрдости матрицы как отдельно, так и в относительной зависимости.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13.1. «Связующие для полимерных и композиционных материалов конструкционного и специального назначения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [20] с использованием оборудования ЦКП Климатические испытания НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### **Выбор схемы нагружения**

Выбор схемы нагружения образцов в виде нагружения консольной балки произведён, исходя из того, что при данном виде нагружения максимальные значения изгибающего момента находятся в месте жёсткой заделки образца, рядом с которой удобно крепить и акустико-эмиссионную антенну. При такой схеме нагружающее устройство закрепляется к свободному концу образца (рис. 1).

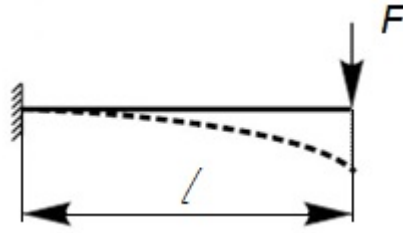


Рис. 1. Схема нагружения образцов

В исследовании были использованы образцы из углепластика КМУ-11ТР толщиной 1,6 мм (8 слоёв препрега), отформованные по режимам, указанным в табл. 1. В качестве наполнителя в образцах использована углеткань УТ-900, а в качестве связующего – эпоксидное связующее марки ЭДТ-69Н. Направление укладки слоёв в образцах – «в 0 градусов». Исследовались по 12 образцов, отобранных из панели, отформованной по одному режиму.

Нагрузка на всех образцах была принята равной  $F = 10\text{ Н}$  (1 кг), а рабочая длина образцов (консоли) во всех случаях составила 220 мм. Влияние режимов формования образцов оценивали по значениям микротвёрдости матрицы, причём эту оценку проводили на лицевой поверхности образцов и в их поперечном сечении в пяти симметричных сечению зонах, условно названных подповерхностные, полусредние и сердцевинные. В качестве базовой поверхности, от которой проводили отсчёт до какой-либо зоны для измерения микротвёрдости, принята лицевая поверхность образцов.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

В табл. 1 приведены значения микротвёрдости матрицы образцов, их режимы формования и удаление зоны измерения от лицевой поверхности. Буквой Т обозначено начальное время режима формования. Под чертой приведено среднее значение в выборке, над чертой – минимальное/максимальное значение.

Таблица 1. Значения микротвёрдости матрицы в образцах КМУ-11ТР

Номер панели	Режим отверждения	Микротвёрдость, МПа				
		Подповерхностная (0,1 мм)	Полусредняя (0,4 мм)	Сердцевинная (0,8 мм)	Полусредняя (1,2 мм)	Подповерхностная (1,5 мм)
1	100 °С – Т	<u>161</u> 156 – 170	<u>200</u> 192 – 211	<u>273</u> 265 – 282	<u>205</u> 192 – 218	<u>160</u> 155 – 168
2	120 °С – Т	<u>179</u> 172 – 185	<u>221</u> 210 – 233	<u>293</u> 277 – 309	<u>222</u> 209 – 237	<u>180</u> 177 – 184
3	130 °С – Т	<u>200</u> 195 – 208	<u>250</u> 241 – 262	<u>313</u> 302 – 328	<u>253</u> 240 – 266	<u>203</u> 200 – 210
4	140 °С – Т	<u>245</u> 242 – 251	<u>282</u> 273 – 291	<u>353</u> 342 – 368	<u>282</u> 266 – 298	<u>243</u> 232 – 253
5	90 °С – 0,5 Т + 120 °С – Т + 145 °С – 1,5 Т	<u>286</u> 272 – 301	<u>310</u> 296 – 326	<u>388</u> 378 – 395	<u>311</u> 303 – 314	<u>284</u> 269 – 305

На рис. 2 показаны зависимости, построенные по результатам, приведённым в табл. 1. Полученное семейство параболических, практически параллельных кривых, свидетельствует о том, что с ростом температуры формования композита повышаются и значения микротвёрдости матрицы. Вместе с этим значения микротвёрдости повы-

шаются от поверхности к сердцевине образца, что важно учитывать при формировании толстостенных конструкций, а также при их контроле.

В табл. 2 представлены средние значения микротвёрдости матрицы, полученные на лицевой поверхности, а также в подповерхностной и сердцевинной зоне углепластиковых образцов толщиной 1,6 мм, отформованных по различным режимам.



Рис. 2. Изменение микротвёрдости по толщине образцов из углепластика, отверждённых при разных температурах:  
 ■ – 100°C ; ◆ – 120°C ; ▲ – 130°C ; × – 140°C ; — – 145°C

Табл. 2. Микротвёрдость матрицы в разных зонах углепластика

Номер панели	Режим отверждения	Микротвёрдость, МПа		
		Лицевая плоскость	Подповерхностная зона	Сердцевинная зона
1	100°C – Т	240	161	273
2	120°C – Т	287	179	293
3	130°C – Т	350	200	313
4	140°C – Т	435	245	353
5	90°C – 0,5 Т + 120°C – Т + 145°C – 1,5 Т	548	286	388

На рис. 3 показано изменение значений микротвёрдости матрицы в подповерхностной и сердцевинной зонах в зависимости от температуры формования композитов. Как видно из представленных зависимостей, значения микротвёрдости матрицы в экстремальных зонах (подповерхностная и сердцевинная) отличаются весьма значительно и составляют 100 МПа и более.

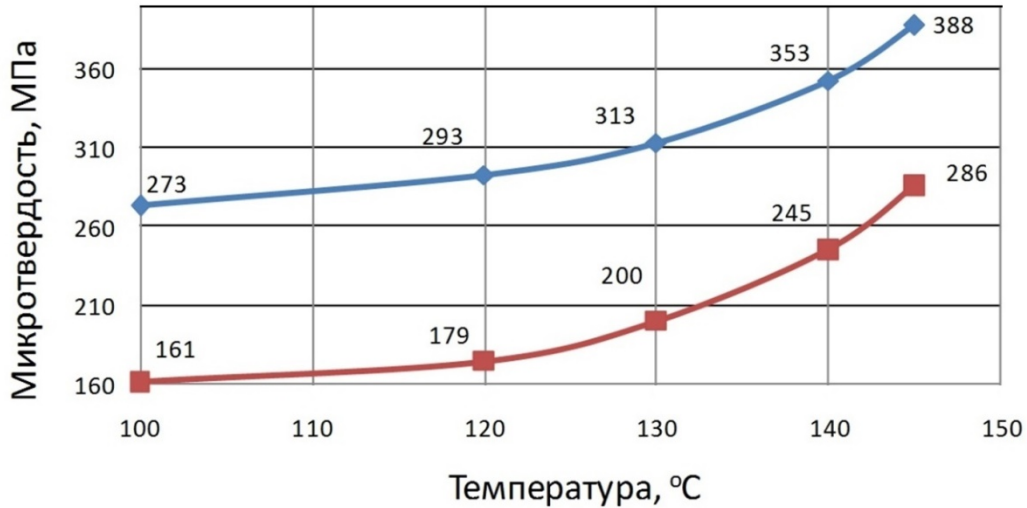


Рис. 3. Изменение микротвёрдости от температуры формования:  
 ■ – поверхностная зона; ◆ – сердцевинная зона

На рис. 4 показана графическая зависимость изменения стрелы прогиба углепластиковых образцов при их консольном нагружении весом, равным 1 кг (10 Н) в зависимости от значений микротвёрдости матрицы, измеренной на лицевой поверхности. Различные значения микротвёрдости матрицы получены в результате формования образцов при различных температурных режимах. Представленная зависимость свидетельствует о том, что с ростом микротвёрдости матрицы стрела прогиба образца снижается.

Учитывая тот факт, что исследуемые образцы отличаются только режимами формования, стрела прогиба будет иметь зависимость от когезионных свойств матрицы (ЭДТ-69Н) и адгезионных свойств системы матрица/волокно. Микротвёрдость матрицы является одним из когезионных параметров. На рис. 4 представлена зависимость прогиба от микротвёрдости матрицы.

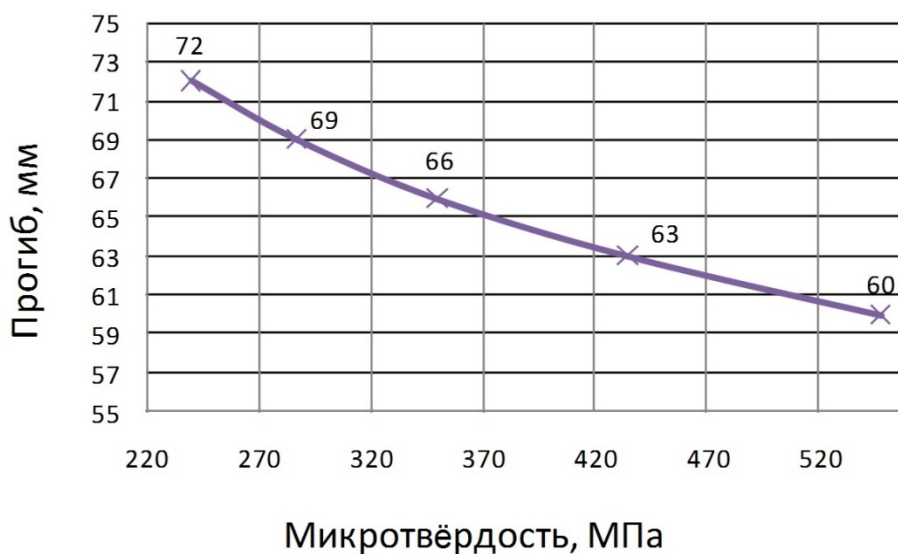
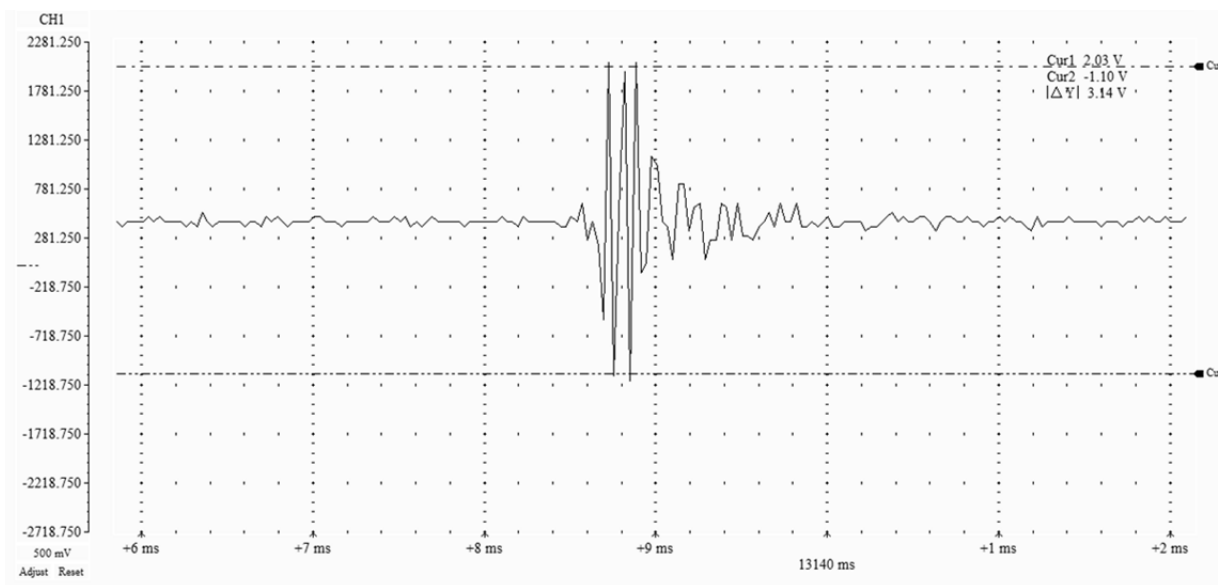
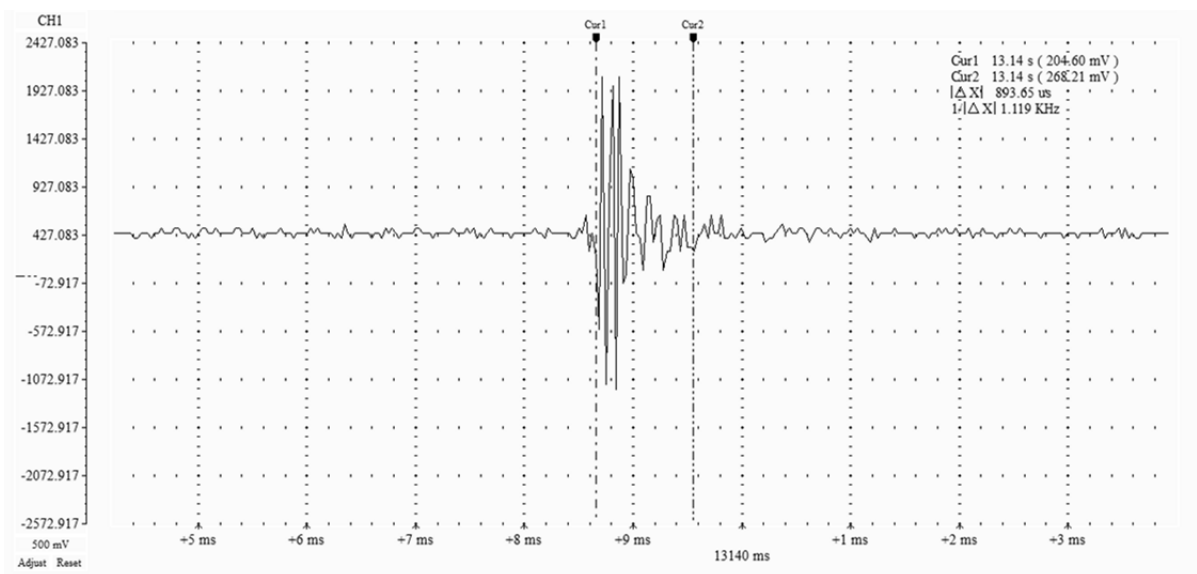


Рис. 4. Зависимость прогиба углепластиковых образцов от микротвёрдости матрицы на лицевой поверхности

На рис. 5, 6 в качестве примера приводятся осциллограммы сигналов акустической эмиссии образца из панели № 4. Сигнал при нагружении консольного образца с датчика акустической эмиссии поступал на специальный кондуктор-усилитель, с которого далее подавался на многофункциональный осциллограф. Осциллограф, оборудованный специальной программой, позволяет проводить измерения как записанного сигнала по его амплитуде, так и по его частоте. При этом программа осциллографа, совмещённая с компьютером, производит автоматическую запись измеренных сигналов как экстремальных (минимум и максимум), так и средних значений. Эти измеренные значения сигнала акустической эмиссии показаны в правом верхнем углу каждого рисунка, зафиксировавшего распространения акустических волн, полученных при нагружении образцов. На рис. 5 показана величина амплитуды сигнала АЭ, которая для этого образца соответствует 3,14 В. На рис. 6 показаны измеренные значения частоты сигнала АЭ на том же участке того же образца. В правом верхнем углу рисунка проставлена замеренная частота акустического сигнала, которая составила 1,12 КГц.



*Рис. 5. Амплитуда сигнала акустической эмиссии в образце панели №4*



*Рис. 6. Частота сигнала акустической эмиссии в образце панели № 4*

В табл. 3 сведены результаты измерений полученных параметров сигналов акустической эмиссии для образцов с различными режимами формования.

Таблица 3. Микротвёрдость матрицы при различных температурных режимах формования

Режим формования	100 °С – Т	120 °С – Т	130 °С – Т	140 °С – Т	90 °С – Т+ 120 °С – Т+ 145 °С – 1,5Т
Амплитуда, В	<u>0,33</u> 0,28 – 0,38	<u>0,63</u> 0,56 – 70	<u>2,04</u> 1,96 – 2,12	<u>3,04</u> 3,01 – 3,23	<u>3,29</u> 3,20 – 3,38
Частота, Гц	<u>55</u> 48 – 60	<u>368</u> 357 – 382	<u>712</u> 693 – 730	<u>1119</u> 1096 – 1144	<u>1170</u> 1155 – 1193

Ранее, в табл. 2, приведены измерения значений микротвёрдости на лицевой поверхности образцов. Видно, что значения микротвёрдости, полученные на лицевой поверхности углепластиковых образцов, существенно отличаются от значений, полученных в подповерхностных зонах, расположенных всего в 0,1 мм от лицевой плоскости в перпендикулярном к ней сечении. Значения микротвёрдости, измеренные на лицевой поверхности, выбраны для построения зависимостей от частоты или амплитуды исходя из того, что именно лицевая поверхность является и максимально деформированной, и подверженной максимальным изгибающим моментам. На рис. 7, 8 представлены такие зависимости.

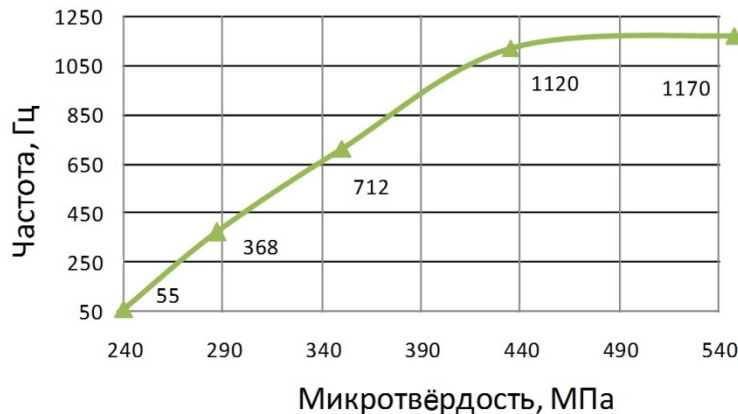


Рис. 7. Зависимость частоты акустических сигналов от микротвёрдости матрицы

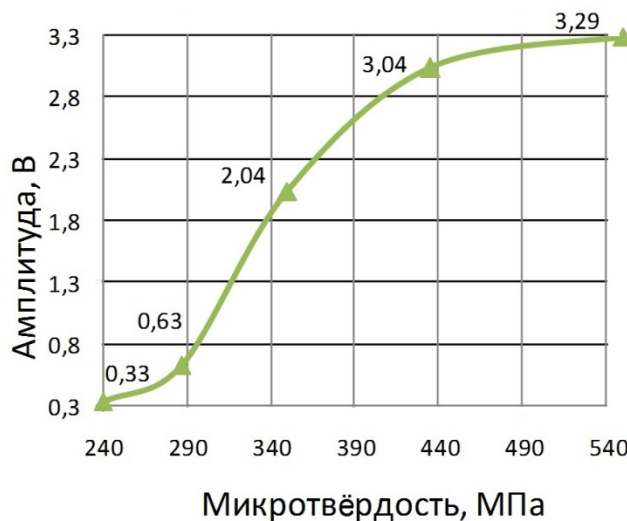


Рис. 8. Зависимость амплитуды акустических сигналов от микротвёрдости матрицы

Из рисунков видно, что с ростом микротвёрдости матрицы углепластика увеличиваются значения частоты и амплитуды сигналов акустической эмиссии. Следует отметить, что уменьшение стрелы прогиба, в свою очередь, означает увеличение упругопрочностных свойств системы «матрица – наполнитель». В любом композите баланс упругости и твёрдости играет важную роль, но существует некоторое предельное значение микротвёрдости матрицы, конкретное для каждой системы «матрица-наполнитель», после которого стрела прогиба не только перестанет уменьшаться, но и может увеличиваться при определённых нагрузках. Например, данный эффект наблюдается при потере усталостной прочности композита. Полученные кривые имеют классический вид диаграммы «напряжение – деформация» и позволяют допустить, что дальнейшее повышение значений микротвёрдости матрицы приведёт к стабилизации значений амплитуды и частоты акустических сигналов. При воздействии критической температуры при формовании и возникающего при этом охрупчивании матрицы, вероятно, увеличится прогиб. В этом случае матрица становится излишне хрупкой и теряет способность эффективно воспринимать и распределять внутренние напряжения при взаимодействии с наполнителем.

Проведённый комплекс исследований показал, что реальным критерием, оценивающим влияние режима формования углепластика, является величина микротвёрдости матрицы, именно значения микротвёрдости матрицы использовали для получения зависимостей оценки сигналов акустической эмиссии в образцах, отформованных по различным температурным режимам.

### **Заключение**

Деформирование углепластиковых образцов по схеме консольного изгиба при одинаковых уровнях нагружения, отформованных по различным температурным режимам, позволило зарегистрировать возникающие сигналы акустической эмиссии, при этом значения частот и амплитуд этих сигналов зависят от режимов формования. Установлены зависимости изменения частоты и амплитуды сигналов акустической эмиссии от величины микротвёрдости матрицы, приобретённой ею во время формования.

Параметры акустической эмиссии могут быть рекомендованы в качестве контрольных величин для определения качественного отверждения матрицы. Выявление корреляционных зависимостей микротвёрдости и параметров акустической эмиссии от механических характеристик пластика может служить критерием контроля качества материала или конструкции. Одним из преимуществ акустическо-эмиссионного анализа является относительно невысокая трудоёмкость и несложное оборудование, в связи с этим данный анализ можно рекомендовать в качестве экспресс-анализа отформованных деталей при условии использования соответствующей методики и определения критериев отбраковки.

Микротвёрдость матрицы эпоксидного связующего также может служить критерием качественной полимеризации и инструментом для разработки методики подбора оптимального режима отверждения или корректировки уже существующего.

Исследование микротвёрдости позволяет получить информацию об анизотропии свойств по толщине пластика, имеет перспективы исследования влияния функциональных добавок при модификации связующего.



**Библиографический список**

1. ГОСТ Р56542-2019. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. М.: Стандартиформ, 2019. 10 с.
2. Носов В.В., Ямилова А.Р. Метод акустической эмиссии. СПб: Лань, 2017. 304 с.
3. Баранов В.М. Ультразвуковые исследования в атомной технике. М.: Атомиздат, 1975. 264 с.
4. Кабанов С.И., Кареев А.Е., Лебедев Е.Ю., Кожемякин В.Л., Рамазанов И.С., Харламов Б.М. Акустико-эмиссионный контроль авиационных конструкций. М.: Машиностроение, 2008. 440 с.
5. Финогенов Г.Н., Риттер Е.Г., Мухутдинов А.Г., Кириллов В.Н. Акустико-эмиссионный метод оценки повреждённости полимерных композитных материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1995. № 12. С. 47-49.
6. Каблов Е.Н., Кулагина Г.С., Железина Г.Ф., Лонский С.Л., Куршев Е.В. Исследование микроструктуры однонаправленного органопластика на основе арамидных волокон Русар-НТ и эпоксидно-полисульфонового связующего // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4. С. 19-26. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-19-26
7. Быков Ю.А., Карпухин С.Д., Полянский В.М. Определение твёрдости нанопокровов : учеб. пособие по курсу «Современные методы исследования структуры материалов». М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 31 с.
8. Круглова А.Н. Метод акустической эмиссии. Исследование разрушения эпоксидных композитов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2009. № 1 (11). С. 273-276.
9. Каблов Е.Н. ВИАМ: Материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7-8. С. 54-58.
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). С. 68-77. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77
11. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П., Пономаренко С.А., Долгова Е.В., Павлюк Б.Ф. Свойства связующего ЭДТ-69Н и ПКМ на его основе // Труды ВИАМ. 2018. № 4 (64). С. 28-37. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-28-37
12. Курицына А.Д. Применение метода микротвёрдости для определения некоторых свойств полимерных материалов // В сб.: «Методы испытания на микротвёрдость». М.: Наука, 1965. С. 255-260.
13. ГОСТ 9450-76. Измерение микротвёрдости вдавливанием алмазных наконечников. М.: Издательство стандартов, 1993. 33 с.
14. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Семенычев В.В., Крашенинникова Е.В. Исследование микротвёрдости и склерометрических характеристик связующего УП-2227Н, отверждённого при различных режимах // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 1. С. 39-45. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-39-45
15. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Семенычев В.В., Крашенинникова Е.В. Анализ некоторых характеристик полимербетона нетрадиционными методами // Клеи. Герметики. Технологии. 2018. № 2. С. 29-34.
16. Кенуй М.Г. Быстрые статистические вычисления. Упрощённые методы оценивания и проверки: справочник. М.: Статистика, 1979. 69 с.
17. Тагер А.А. Физико-химия полимеров. М.: Научный мир, 2007. 576 с.
18. Вульф Б.К., Ромадин К.П. Авиационное материаловедение. М.: Машиностроение, 1967. 391 с.

19. Львова Н.А., Кравчук К.С., Широков И.А. Алгоритмы обработки изображений царапин в методе склерометрии // *Физика твёрдого тела*. 2013. Т. 55, № 8. С. 1570-1577.

20. 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

## APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION AND SCLEROSCOPY FOR THE ANALYSIS OF CARBON FIBER-REINFORCED PLASTIC SAMPLES WITH DIFFERENT DEGREES OF MATRIX CURING

© 2022

**E. A. Veshkin** Candidate of Science (Engineering), Head of Branch;  
Ulyanovsk Scientific and Technological Center  
“All-Russian Scientific and Technical Institute of Aviation Materials”  
of the National Research Center “Kurchatov Institute”;  
[untcviam@viam.ru](mailto:untcviam@viam.ru)

**S. E. Istyagin** Industrial Engineer;  
Ulyanovsk Scientific and Technological Center  
“All-Russian Scientific and Technical Institute of Aviation Materials”  
of the National Research Center “Kurchatov Institute”;  
[fratos19@mail.ru](mailto:fratos19@mail.ru)

**S. G. Kirilin** Leading Engineer;  
Ulyanovsk Scientific and Technological Center  
“All-Russian Scientific and Technical Institute of Aviation Materials”  
of the National Research Center “Kurchatov Institute”;  
[untcviam@viam.ru](mailto:untcviam@viam.ru)

**V. V. Semenychev** Candidate of Science (Engineering), Chief Research Scientist;  
Ulyanovsk Scientific and Technological Center  
“All-Russian Scientific and Technical Institute of Aviation Materials”  
of the National Research Center “Kurchatov Institute”;  
[untcviam@viam.ru](mailto:untcviam@viam.ru)

Samples made of a 1.6 mm thick carbon fiber-reinforced plastic sheet with different curing modes were loaded in the elastic region according to the cantilever bending scheme. Acoustic emission was recorded using an oscilloscope. The microhardness characteristics were used as criteria evaluating the degree of matrix curing which was evaluated on the face surface of the samples and in its cross section at fixed distances from the face surface. Dependences of the frequency, amplitude of acoustic signals, temperature, deflection value and distance to the sample surface on the matrix microhardness were established. The studies showed that the value of matrix microhardness is a relevant criterion evaluating the influence of the mode of carbon fiber-reinforced plastic molding.

*Carbon fiber-reinforced plastic; curing modes; microscopic studies; acoustic emission method; sclerometry; microhardness*

---

*Citation:* Veshkin E.A., Istyagin S.E., Kirilin S.G., Semenychev V.V. Application of acoustic emission and sclerometry for the analysis of carbon fiber-reinforced plastic samples with different degrees of matrix curing. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2022. V. 21, no. 3. P. 85-95.  
DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-3-85-95

### References

1. GOST R 56542-2019. Non-destructive testing. Classification of types and methods. Moscow: Standartinform Publ., 2019. 10 p. (In Russ.)
2. Nosov V.V., Yamilova A.R. *Metod akusticheskoy emissii* [Acoustic emission method]. SPb: Lan' Publ., 2017. 304 p.
3. Baranov V.M. *Ul'trazvukovye issledovaniya v atomnoy tekhnike* [Ultrasonic analysis in nuclear engineering]. Moscow: Atomizdat Publ., 1975. 264 p.

4. Kabanov S.I., Kareev A.E., Lebedev E.Yu., Kozhemyakin V.L., Ramazanov I.S., Kharlamov B.M. *Akustiko-emissionnyy kontrol' aviatsionnykh konstruksiy* [Acoustic emission testing of aircraft structures]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2008. 440 p.
5. Finogenov G.N., Ritter E.G., Mukhutdinov A.G., Kirillov V.N. Acoustic emission method for damage assessment of polymer composite materials. *Industrial laboratory. Diagnostics of Materials*. 1995. No. 12. P. 47-49. (In Russ.)
6. Kablov E.N., Kulagina G.S., Zhelezina G.F., Lonskii S.L., Kurshev E.V. Microstructure research of the unidirectional organoplastic based on rusar-nt aramid fibers and epoxy-polysulfone binder. *Aviation Materials and Technologies*. 2020. No. 4. P. 19-26. (In Russ.). DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-19-26
7. Bykov Yu.A., Karpukhin S.D., Polyanskiy V.M. *Opreделение tverdosti nanopokrytiy: ucheb. posobie po kursu «Sovremennye metody issledovaniya struktury materialov»* [Determination of nanocoating hardness: manual on the course «Modern methods of research of material structure»]. Moscow: Bauman University Publ., 2010. 31 p.
8. Kruglova A.N. Acoustic emission method: investigation of epoxy composites destruction. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2009. No. 1 (11). P. 273-276. (In Russ.)
9. Kablov E.N. VIAM: Materials of a new generation for PD-14. *Kryl'ya Rodiny*. 2019. No. 7-8. P. 54-58. (In Russ.)
10. Kablov E.N., Valueva M.I., Zelenina I.V., Khmel'nitskiy V.V., Aleksashin V.M. Carbon plastics on the basis of benzoxazine oligomers – promising materials. *Proceedings of VIAM*. 2020. No. 1 (85). P. 68-77. (In Russ.). DOI 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77
11. Mukhametov R.R., Petrova A.P., Ponomarenko S.A., Dolgova E.V., Pavlyuk B.Ph. Properties of binder EDT-69H and PCM on its basis. *Proceedings of VIAM*. 2018. No. 4 (64). P. 28-37. (In Russ.). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-28-37
12. Kuritsyna A.D. Primenenie metoda mikrotverdosti dlya opredeleniya nekotorykh svoystv polimernykh materialov. *V sb.: «Metody Ispytaniya na Mikrotverdost'»*. Moscow: Nauka Publ., 1965. P. 255-260. (In Russ.)
13. GOST 9450-76. Measurements microhardness by diamond instruments indentation. Moscow: Izdatel'stvo Standartov Publ., 1993. 33 p. (In Russ.)
14. Veshkin E.A., Postnov V.I., Semenychev V.V., Krashennnikova E.V. Research of microhardness and sclerometric characteristics of the binding up-2227n, cured by different regimes. *Aviation Materials and Technologies*. 2018. No. 1. P. 39-45. (In Russ.). DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-39-45.
15. Veshkin E.A., Postnov V.I., Semenychev V.V., Krashennnikova E.V. Analysis of some characteristics of polymer concrete by unconventional methods. *Adhesives. Sealants. Technologies*. 2018. No. 2. P. 29-34. (In Russ.)
16. Quenouille M.H. Rapid statistical calculations. London: Griffin Publ., 1972. 74 p.
17. Tager A.A. *Fiziko-khimiya polimerov* [Physical chemistry of polymers]. Moscow: Nauchnyy Mir Publ., 2007. 576 p.
18. Vul'f B.K., Romadin K.P. *Aviatsionnoe materialovedenie* [Aviation material science]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1967. 391 p.
19. Lvova N.A., Kravchuk K.S., Shirokov I.A. Algorithms for processing scratch images in the sclerometry method. *Physics of the Solid State*. 2013. V. 55, Iss. 8. P. 1681-1689. DOI: 10.1134/S1063783413080179
20. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviation Materials and Technologies*. 2015. No. 1 (34). P. 3-33 (In Russ.). DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33