

Научная статья

УДК 691.666.1-9

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-15-25

## ХАРАКТЕРИСТИКИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ДЕФОРМИРУЕМЫХ ОБРАЗЦАХ ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКА С РАЗЛИЧНЫМИ РЕЖИМАМИ ОТВЕРЖДЕНИЯ

Е.А. Вешкин<sup>1</sup>, С.Е. Истягин<sup>1</sup>, С.Г. Кирилин<sup>1</sup>, В.В. Семенычев<sup>1</sup>

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

**Аннотация.** Образцы из листа стеклопластика толщиной 1,6 мм с различными режимами отверждения матрицы нагружали в упругой области по схеме консольного изгиба. При этом регистрировали как экстремальные, так и средние значения частот и амплитуд эмиссионных сигналов, кроме того, вели регистрацию длительности сигналов акустической эмиссии. Критериями, оценивающими степень отверждения матрицы, выбрали величину ее микротвердости. Зарегистрированные сигналы акустической эмиссии на различных образцах анализировали с учетом значений микротвердости матрицы, после чего строили соответствующие зависимости.

**Ключевые слова:** стеклопластик, режимы отверждения, микротвердость, акустическая эмиссия, микроскопические исследования, склерометрия

**Для цитирования:** Вешкин Е.А., Истягин С.Е., Кирилин С.Г., Семенычев В.В. Характеристики акустической эмиссии в деформируемых образцах из стеклопластика с различными режимами отверждения // Труды ВИАМ. 2022. № 5 (111). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-15-25.

Scientific article

## ACOUSTIC EMISSION CHARACTERISTICS IN DEFORMABLE FIBERGLASS SAMPLES WITH DIFFERENT CURING MODES

E.A. Veshkin<sup>1</sup>, S.E. Istyagin<sup>1</sup>, S.G. Kirilin<sup>1</sup>, V.V. Semenychev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal 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 1.6 mm thick fiberglass plastic sheet with different matrix curing modes were loaded in the elastic region according to the cantilever bending scheme. Both extreme and average values of frequencies and amplitudes of emission signals were recorded, besides, the duration of acoustic emission signals was recorded too. The criteria for evaluating the degree of matrix curing were the value of its microhardness. The acoustic emission signals recorded on various samples were analyzed with the matrix microhardness values taken into account, after which the corresponding dependences were plotted.

**Keywords:** fiberglass, curing modes, microhardness, acoustic emission, microscopic studies, sclerometry

**For citation:** Veshkin E.A., Istyagin S.E., Kirilin S.G., Semenychev V.V. Acoustic emission characteristics in deformable fiberglass samples with different curing modes. *Trudy VIAM*, 2022, no. 5 (111), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-15-25.

### **Введение**

Как известно, акустико-эмиссионный контроль является пассивным методом контроля. Его идея заключается в том, чтобы регистрировать упругие и переходные волны, появляющиеся в теле объекта в связи с изменением его структуры, к которым следует отнести возникновение напряженных состояний, деформаций, внешних механических воздействий и т. д. [1]. Согласно ГОСТ 27655–88, акустическая эмиссия материала вызывается его динамической локальной перестройкой. Классическим примером источника акустической эмиссии является процесс деформирования, связанный с ростом дефектов, таких как трещины или зоны пластической деформации, поэтому акустическая эмиссия является следствием подвижек среды, что позволяет использовать ее для диагностики процессов, происходящих в материалах [2]. Акустические волны распространяются от источника их образования к датчикам-преобразователям акустической эмиссии, где приобретают вид электрических сигналов, поступающих в систему для дальнейшей обработки и анализа. Например, в количественном выражении акустическая эмиссия может выступать в качестве критерия целостности материала, который определяется его звуковым излучением при контрольном нагружении. Кроме того, эффект акустической эмиссии может использоваться для выявления внутренних дефектов и их образования на начальной стадии разрушения конструкции, поскольку позволяет регистрировать единичные изменения в материале с энергией дефекта до  $10^{-16}$  Дж. Каждое изменение в структуре материала отражается в акустическом импульсе (-ах), который (-ые) испускает как сам материал за счет дислокации, так и внутренние искажения структуры типа трещин, несплошностей и т. п. Одним из ограничений применения классического ультразвукового контроля с помощью вынужденных колебаний является неспособность зафиксировать наличие зарождающихся дефектов, так как отражение от них ультразвуковых волн практически не идентифицируется. Метод акустической эмиссии дает возможность исследовать кинетику процессов на самых ранних стадиях микродеформации, дислокационного зарождения и накопления микронесплошностей и, таким образом, позволяет диагностировать и прогнозировать сам момент зарождения трещины [3].

В настоящее время широкое распространение получили полимерные композиционные материалы (ПКМ) с различными матрицами и наполнителями, в качестве которых могут использоваться самые разнообразные волокна и ткани. В этой связи появились и работы, где представлены исследования сигналов акустической эмиссии в образцах из композиционных материалов при их осевом нагружении [4].

Принятыми Стратегическими направлениями развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. предусмотрено создание новейших функциональных ПКМ с повышенным уровнем свойств [5, 6], в состав которых будут входить самые разнообразные связующие [7]. Новый уровень эксплуатационных свойств полимерных композитов определяется выбором не только связующего и наполнителя, но и разработанной технологии изготовления детали, заготовки или полуфабриката. Номенклатура применяемых в промышленности наполнителей и связующих меньше гаммы технологических процессов изготовления деталей из разного рода композиционных материалов, а секреты их производства для реализации этих технологий весьма внушительны.

Обоснованием необходимости проведения технологических или материаловедческих исследований является получение объективных сведений о свойствах разработанных материалов, полученных с использованием наукоемких технологий, при этом данные сведения должны отличаться высокой информативностью результатов эксперимента [8]. К таким информационным методам исследования необходимо отнести оценку микротвердости матрицы композита [9], являющуюся дифференциальной характеристикой, в связи с чем у экспериментатора появляется возможность получить дополнительную измеряемую информацию об изучаемом предмете исследования.

Следует отметить, что микроисследования – это высокоинформативный и распространенный тип исследований [10, 11]. Данный метод, являясь чувствительным к изменению структуры методом, позволяет оценить не только свойства материала в какой-либо точке [12], но и их изменение в объеме [13]. Кроме того, микротвердость может быть использована и при оценке анизотропии свойств материала [3].

В связи с этим следует акцентировать внимание на том, что все новые технологические разработки по изготовлению деталей из ПКМ требуют всесторонней оценки свойств полученного материала [14–16] и что применение статистических методов исследования [17], как правило, приводит к получению более объективной информации о его особенностях [18, 19].

Цель данной работы – исследование микротвердости матрицы стеклопластиков в поперечном сечении и на лицевой поверхности образцов в зависимости от режимов их формования, а также изучение формирования сигналов акустической эмиссии в образцах из стеклопластика при их деформировании по схеме консольного изгиба в зависимости от свойств матрицы и поиск закономерностей в характеристиках эмиссионных сигналов без влияния внутренних дефектов.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 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»).

### Материалы и методы

В качестве объекта исследований использованы образцы из стеклопластика СТ-69Н, отформованные при определенных режимах, в качестве наполнителя в образцах – стеклоткань Т-10-80, а в качестве связующего – эпоксидная смола ЭДТ-69Н. Для достижения толщины образцов, равной 1,6 мм, использованы 8 слоев препрега.

Схема нагружения образцов в виде консольной балки выбрана исходя из того, что при таком виде нагружения максимальные значения изгибающего момента находятся в месте жесткой заделки образца, рядом с которым удобно крепить и акустико-эмиссионный преобразователь. Данная схема легко позволяет закрепить к свободному концу образца нагружающее устройство.

На рис. 1 показана схема нагружения консольного образца грузом и приведена формула для расчета изгибающего момента. Для данного случая эпюра изгибающих моментов представляет собой треугольник с максимальным изгибающим моментом в заделке образца и нулевым – на свободном конце балки.

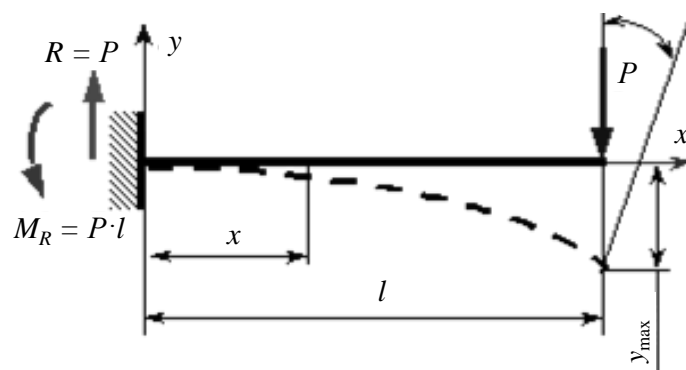


Рис. 1. Схема нагружения образца, где  $l$  – рабочая длина образца,  $R$  – реакция опоры (заделки),  $M_R$  – изгибающий момент,  $x$  – расстояние до начала изгиба образца,  $P$  – груз (нагрузка),  $y_{\max}$  – максимальная величина прогиба торца образца

Рабочая длина у всех образцов составляла 220 мм, а нагрузка на их консоли принята равной 10 Н (1 кг). Влияние режимов формования образцов оценивали по величине микротвердости матрицы, причем эту оценку проводили на лицевой поверхности образцов и в их поперечном сечении в пяти симметричных сечению зонах, условно названных подповерхностными, полусредними и сердцевинными. В качестве базовой поверхности, от которой проводили отсчет до зоны измерения микротвердости, принята лицевая поверхность образцов, прилегающих к цулаге при формовании.

**Результаты и обсуждение**

В табл. 1 приведены режимы формования образцов из стеклопластика, даны значения микротвердости матрицы в различных зонах и показано удаление этих зон от лицевой поверхности.

Таблица 1

**Микротвердость матрицы в зонах удаления от лицевой поверхности образцов из стеклопластика**

Режим формования	Значения микротвердости, МПа, в зонах				
	подповерхностной		полусредней		сердцевинной
	удаление от лицевой поверхности, мм				
	0,1	1,5	0,4	1,2	0,8
100 °С – <i>t</i>	184	182	219	220	262
120 °С – <i>t</i>	224	221	255	257	302
130 °С – <i>t</i>	243	241	274	270	317
140 °С – <i>t</i>	261	264	297	300	337
(90 °С – 0,5 <i>t</i> ) + + (120 °С – <i>t</i> ) + + (145 °С – 1,5 <i>t</i> )	293	295	332	330	364

Примечание. *t* – начальное время режима формования.

На рис. 2 представлено изменение микротвердости матрицы образцов из стеклопластика. Полученное семейство параболических почти параллельных кривых свидетельствует о том, что в поперечном сечении образцов минимальные значения микротвердости наблюдаются в подповерхностных зонах, а максимальные – в сердцевинных. Кроме того, с увеличением температуры формования композиционного материала повышаются и значения микротвердости матрицы.

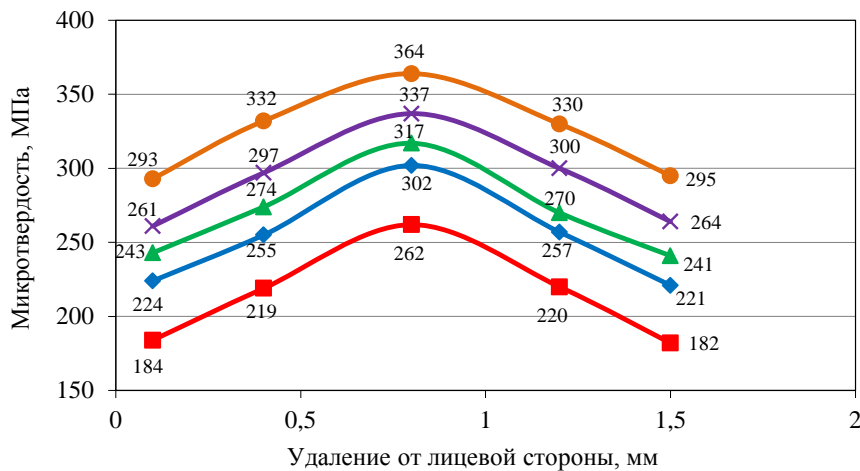


Рис. 2. Изменение микротвердости матрицы по толщине образцов из стеклопластика, отвержденных при температурах 100 (■), 120 (◆), 130 (▲), 140 (✕) и 145 °C (●; базовый режим)

В табл. 2 представлены значения микротвердости матрицы, полученные на лицевой поверхности, а также в подповерхностных и сердцевинных зонах образцов из стеклопластика толщиной 1,6 мм, отформованных по различным режимам.

Таблица 2

**Микротвердость матрицы в разных зонах образцов из стеклопластика толщиной 1,6 мм**

Режим отверждения	Значения микротвердости, МПа		
	на лицевой плоскости	в подповерхностной зоне	в сердцевинной зоне
100 °С – $t$	240	184	262
120 °С – $t$	277	224	302
130 °С – $t$	368	243	317
140 °С – $t$	416	261	337
(90 °С – 0,5 $t$ ) + + (120 °С – $t$ ) + + (145 °С – 1,5 $t$ )	590	293	364

Примечание.  $t$  – начальное время режима формования.

На рис. 3 представлена зависимость микротвердости матрицы от температуры формования композиционных материалов. Показано, что кривые соответствуют значениям, полученным в подповерхностных и сердцевинных зонах. Микроструктуру испытываемых образцов из стеклопластика оценивали на образцах-шлифах.

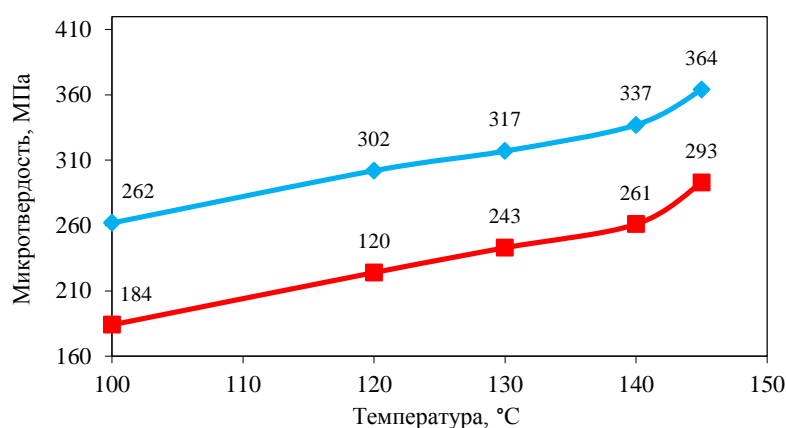


Рис. 3. Изменение микротвердости матрицы образцов из стеклопластика в зависимости от температуры формования в подповерхностной (■) и сердцевинной зонах (◆)

Полученные результаты свидетельствуют о значительной разнице в микротвердости матрицы, измеренной в подповерхностной и сердцевинной зонах образцов из стеклопластика. Видно, что величины микротвердости матрицы отличаются на 100 МПа и более. Это можно объяснить тем, что температура в сердцевинной зоне после выключения обогрева сохраняется более длительное время вследствие низкой теплопроводности стеклопластика.

На рис. 4 показано изменение стрелы прогиба образцов из стеклопластика при их консольном нагружении в зависимости от микротвердости матрицы, измеренной на лицевой поверхности. Различные значения микротвердости матрицы получены в результате формования образцов при разных температурных режимах. Показано, что с увеличением микротвердости матрицы стрела прогиба образца уменьшается. Поскольку все образцы набраны из 8 слоев препрега (стеклоткань Т-10-80 со связующим

ЭДТ-69Н), в исследованном диапазоне температур формования разница прогиба образцов определяется только значениями микротвердости матрицы.

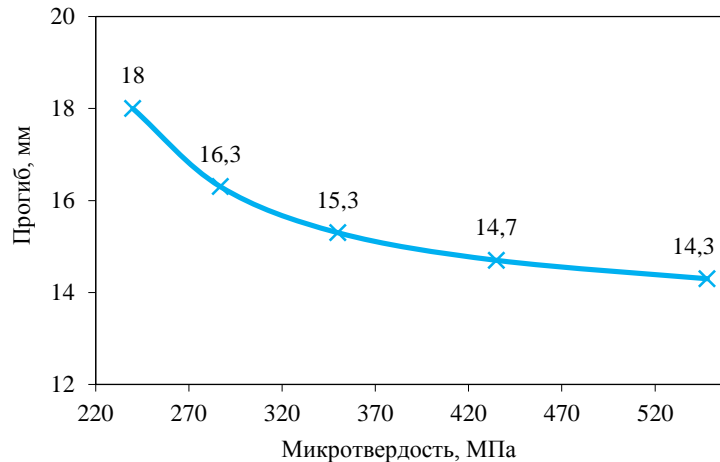


Рис. 4. Изменение прогиба образцов из стеклопластика в зависимости от микротвердости матрицы на лицевой поверхности

При обсуждении результатов, полученных при измерении сигналов акустической эмиссии образцов из стеклопластика, следует пояснить методику проведения измерений. Сигналы с датчика акустической эмиссии, возникающие при нагружении консольного образца, поступали на специальный кондуктор-усилитель, с которого, в свою очередь, подавались на многофункциональный осциллограф. Осциллограф, оборудованный специальной программой, позволяет проводить измерение полученных сигналов как по его амплитуде, так и по частоте. С помощью данной программы, совмещенной с компьютером, производится автоматическая запись измеренных сигналов акустической эмиссии как с экстремальными (минимальными и максимальными), так и со средними значениями. Результаты проведенных измерений представляются в виде готовых графиков, причем численные значения сигналов акустической эмиссии показаны в правом верхнем углу каждого графика, характеризующего распространение акустических волн, полученных при нагружении образцов. Подобный порядок исследования и обработки измеренных сигналов является базовым при использовании метода акустической эмиссии и применялся в других работах [20].

На рис. 5 и 6 показаны осциллограммы полученных сигналов акустической эмиссии на образце из стеклопластика: на рис. 5 представлен график изменения амплитуды сигнала акустической эмиссии, максимальное значение которой для данного образца составляет 2,3 В, а на рис. 6 – график изменения частоты сигнала акустической эмиссии на том же образце. В правом верхнем углу находятся полученные значения частоты и длительности акустического сигнала, которые на этом участке составили 1,67 кГц и 598 мкс соответственно. Как видно из графиков, зафиксирован акустический импульс относительно фонового шума образца. По данным зарегистрированного акустического импульса определены параметры акустического пика.

Аналогично приведенным на рис. 5 и 6 в качестве примера осциллограммам сигналов акустической эмиссии, полученным на образце из стеклопластика, построены и обработаны подобные графики и для всех других образцов, прошедших иные режимы отверждения. Получены различные значения микротвердости матрицы в образцах. В табл. 3 представлены результаты измерений параметров сигналов акустической эмиссии для образцов с различными режимами формования, а следовательно,

и с различными значениями микротвердости матрицы, измеренной на их лицевой поверхности. В качестве параметров сигналов акустической эмиссии приняты амплитуда сигналов, их частота и длительность.

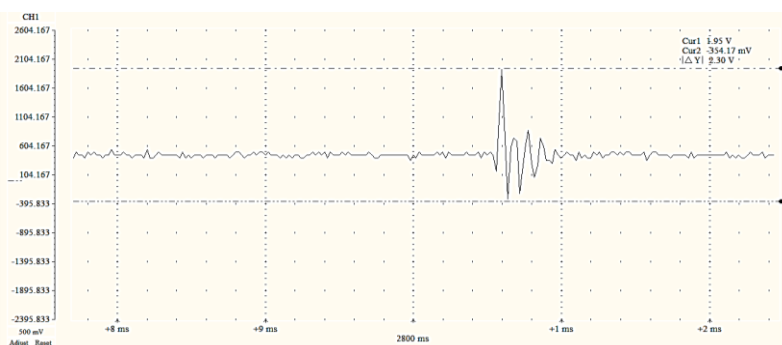


Рис. 5. Амплитуда сигналов акустической эмиссии в образце из стеклопластика (режим формования:  $140\text{ }^{\circ}\text{C} - t$ )

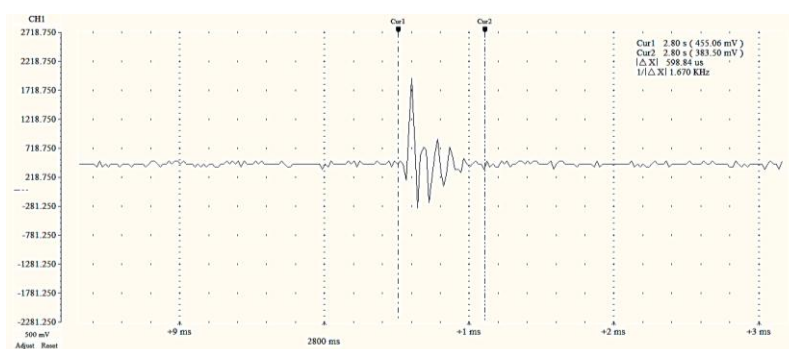


Рис. 6. Частота сигналов акустической эмиссии в образце из стеклопластика (режим формования:  $140\text{ }^{\circ}\text{C} - t$ )

Таблица 3

**Амплитуды и частоты сигналов акустической эмиссии для разных режимов формования**

Параметры сигналов	Значения параметров сигналов при режиме формования				
	$100\text{ }^{\circ}\text{C} - t$	$120\text{ }^{\circ}\text{C} - t$	$130\text{ }^{\circ}\text{C} - t$	$140\text{ }^{\circ}\text{C} - t$	$(90\text{ }^{\circ}\text{C} - 0,5t) + (120\text{ }^{\circ}\text{C} - t) + (145\text{ }^{\circ}\text{C} - 1,5t)$
Микротвердость матрицы, МПа	240	277	368	416	590
Амплитуда, В	1,84	2,1	2,8	3,1	3,2
Частота, Гц	89,85	444	1120	1680	1770
Длительность, мкс	12280	6800	2000	598	257

Примечание.  $t$  – начальное время режима формования.

По результатам измерения микротвердости на лицевой поверхности образцов из стеклопластика, приведенным в табл. 2, видно, что данные значения существенно отличаются от значений, полученных в подповерхностных зонах, расположенных всего в 0,1 мм от лицевой плоскости, но в перпендикулярном к ней сечении. Значения микротвердости, измеренные на лицевой поверхности, выбраны для построения графиков зависимостей данной характеристики от частоты, амплитуды или длительности эмиссионного сигнала, поскольку именно лицевая поверхность является максимально деформированной и подвержена максимальным изгибающим моментам (рис. 7–9).

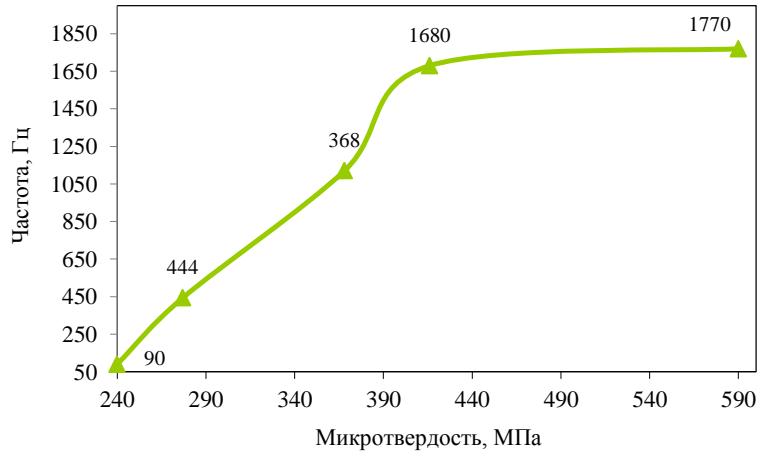


Рис. 7. Зависимость частоты акустических сигналов от микротвердости матрицы

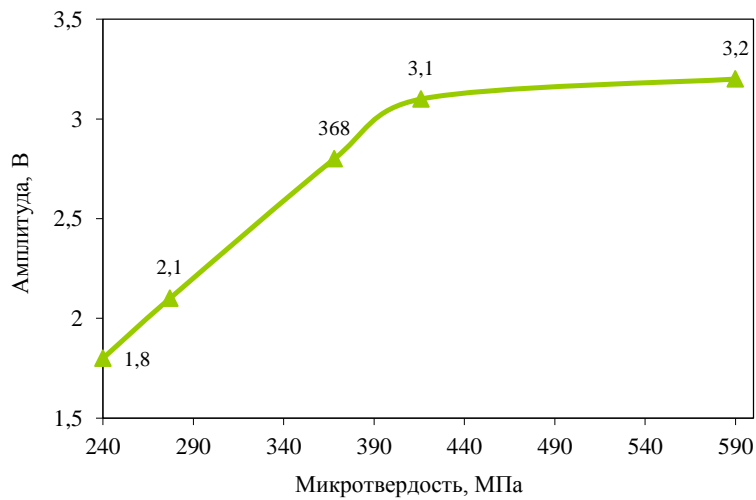


Рис. 8. Зависимость амплитуды акустических сигналов от микротвердости матрицы

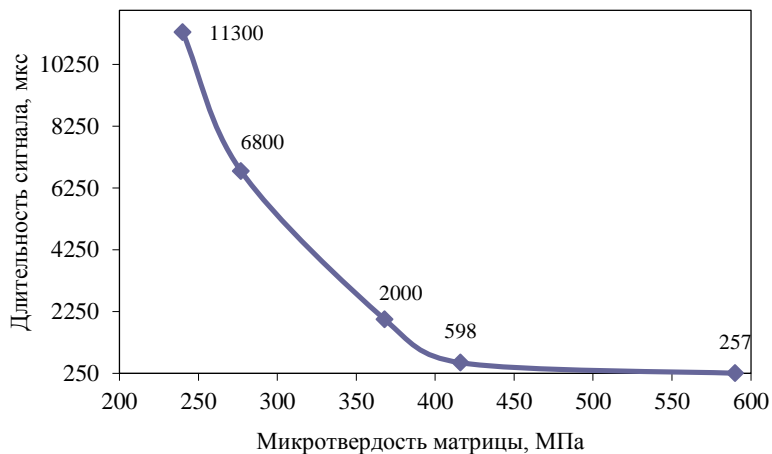


Рис. 9. Зависимость длительности акустического сигнала от микротвердости матрицы

Из данных, представленных на рис. 7 и 8, видно, что с увеличением микротвердости матрицы стеклопластика повышаются значения частоты и амплитуды сигналов акустической эмиссии. Следует отметить, что ход обсуждаемых кривых позволяет

допустить, что дальнейшее повышение значений микротвердости матрицы приведет к стабилизации значений амплитуды и частоты акустических сигналов. Таким образом, наблюдаются прямая зависимость амплитуды и частоты акустической эмиссии от микротвердости матрицы и обратная зависимость стрелы прогиба и длительности акустического сигнала от микротвердости матрицы.

График зависимости, приведенный на рис. 9, свидетельствует о том, что с повышением микротвердости матрицы в стеклопластике длительность акустического сигнала существенно снижается – иными словами, в вязких средах сигналы акустической эмиссии распространяются медленнее, чем в хрупких.

Проведенный комплекс исследований показал, что величина микротвердости матрицы является эффективным критерием оценки влияния режима формования стеклопластика на качество отверждения матрицы. Именно значения микротвердости матрицы использовали для получения зависимостей, характеризующих особенности распространения сигналов акустической эмиссии в образцах, отформованных по различным температурным режимам.

### Заключения

Деформирование образцов из стеклопластика (по схеме консольного изгиба при одинаковых уровнях нагружения), отформованных по различным температурным режимам, позволило измерить возникающие сигналы акустической эмиссии, при этом величины зарегистрированных частот, амплитуд и длительности этих сигналов зависят от режимов формования. Получены экспериментальные зависимости изменения характеристик сигналов акустической эмиссии от величины микротвердости матрицы стеклопластика после формования образцов по разным режимам.

Параметры акустической эмиссии можно рекомендовать в качестве контрольных, в частности для определения качественного отверждения матрицы. Выявление корреляционных зависимостей микротвердости и параметров акустической эмиссии от механических характеристик полученного пластика послужит прямым способом контроля качества отверждения. Преимуществами акустико-эмиссионного анализа являются относительно невысокая трудоемкость и применение технологически несложного оборудования. В связи с этим данный анализ можно рекомендовать в качестве экспресс-анализа отформованных деталей из стеклопластиков при условии составления соответствующей методики и определения критериев отбраковки.

Микротвердость матрицы эпоксидного связующего может служить критерием качественной полимеризации, а также инструментом для разработки оптимального режима отверждения или корректировки уже существующего. Кроме того, исследование микротвердости дает информацию об анизотропии свойств по толщине пластика.

### Список источников

1. ГОСТ Р 56542–2015. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. М.: Стандартинформ, 2019. 10 с.
2. Носов В.В., Ямилова А.Р. Метод акустической эмиссии. СПб.: Лань, 2017. 304 с.
3. Буйло С.И. Физико-механические, статистические и химические аспекты акустико-эмиссионной диагностики. Ростов н/Д; Таганрог: Изд-во Южного федер. ун-та, 2017. 184 с.
4. 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.
5. 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.

6. 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.
7. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // Тез. докл. XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. С. 25–26.
8. Курицына А.Д. Применение метода микротвердости для определения некоторых свойств полимерных материалов. Методы испытания на микротвердость. М.: Наука, 1965. С. 255–260.
9. ГОСТ 9450–76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. М.: Изд-во стандартов, 1993. 35 с.
10. 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 (61). С. 19–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-19-26.
11. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Уткин Д.А. Методы определения механических характеристик материалов с помощью индентирования (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 10. URL: <https://journal.viam.ru> (дата обращения: 20.01.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-104-118.
12. 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 (50). С. 39–45. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-39-45.
13. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Семенычев В.В., Крашенинникова Е.В. Закономерности проявления анизотропии свойств в трех взаимно перпендикулярных сечениях стеклоглепестика // *Пластические массы*. 2020. № 5–6. С. 15–19.
14. Платонов А.А., Коган Д.И., Душин М.И. Изготовление трехмерноразмерных ПКМ методом пропитки пленочным связующим // *Пластические массы*. 2013. № 6. С. 56–61.
15. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Семенычев В.В. Оценка микротвердости образцов на основе связующего ВСТ-1210, отвержденного по различным режимам, как способ тестирования // *Материаловедение*. 2018. № 6. С. 1–3.
16. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // *Вестник Российской академии наук*. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
17. Кенуй М.Г. Быстрые статистические вычисления. Упрощенные методы оценивания и проверки: справочник. М.: Статистика, 1979. 69 с.
18. Вульф Б.К., Ромадин К.П. *Авиационное материаловедение*. М.: Машиностроение, 1967. 391 с.
19. Тагер А.А. *Физико-химия полимеров*. М.: Научный мир, 2007. 128 с.
20. Круглова А.Н. Метод акустической эмиссии. Исследование разрушения эпоксидных композиций // *Известия КазГАСУ*. 2009. № 1 (11). С. 273–276.

#### References

1. State Standard 56542–2015. *The control is non-destructive. Classification of types and methods*. Moscow: Standartinform, 2019, 10 p.
2. Nosov V.V., Yamilova A.R. *Acoustic emission method*. St. Petersburg: Lan, 2017, 304 p.
3. Buylo S.I. Physico-mechanical, statistical and chemical aspects of acoustic emission diagnostics. Rostov-on-Don; Taganrog: Publishing House of the Southern Fed. University, 2017, 184 p.
4. 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.
5. 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». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

6. 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.
7. Kablov E.N. The role of chemistry in the creation of new generation materials for complex technical systems. *Report XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2016, pp. 25–26.
8. Kuritsyna A.D. *Application of the microhardness method to determine some properties of polymeric materials. Test methods for microhardness*. Moscow: Nauka, 1965, pp. 255–260.
9. State Standard 9450–76. *Measurement of microhardness by indentation of diamond tips*. Moscow: Publishing house of standards, 1993, 35 p.
10. 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. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 19–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-19-26.
11. Erasov V.S., Oreshko E.I. Tests for fatigue of metal materials (review). Part 2. Analysis of the Basquin–Manson–Coffin equation. Methods of testing and processing of results. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 20, 2022). DOI: 10.18577/2071-9140-2021-0-1-80-94.
12. Veshkin E.A., Postnov V.I., Semenychev V.V., Krasheninnikova 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.
13. Veshkin E.A., Postnov V.I., Semenychev V.V., Krasheninnikova 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.
14. 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.
15. Veshkin E.A., Postnov V.I., Semenychev V.V. Evaluation of the microhardness of samples based on the binder VST-1210, cured according to various modes, as a testing method. *Materialovedenie*, 2018, no. 6, pp. 1–3.
16. Kablov E.N. Materials of a new generation and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
17. Keny M.G. *Fast statistical calculations. Simplified assessment and verification methods*: handbook. Moscow: Statistics, 1979, 69 p.
18. Vulf B.K., Romadin K.P. *Aviation materials science*. Moscow: Mashinostroenie, 1967, 391 p.
19. Tager A.A. *Physico-chemistry of polymers*. Moscow: Nauchnyy mir, 2007, 128 p.
20. Kruglova A.N. Acoustic emission method. Study of the destruction of epoxy composites. *Izvestiya KazGASU*, 2009, no. 1 (11), pp. 273–276.

#### Информация об авторах

**Вешкин Евгений Алексеевич**, начальник филиала, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Истягин Сергей Евгеньевич**, инженер-технолог 3 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Кирилин Сергей Геннадьевич**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Семеничев Валентин Владимирович**, главный научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

#### Information about the authors

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

**Sergey E. Istyagin**, Third category engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Sergey G. Kirilin**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

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

Статья поступила в редакцию 03.02.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 10.02.2022.

The article was submitted 03.02.2022; approved and accepted for publication after reviewing 10.02.2022.