

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСТЯЖЕНИЯ АРМИРУЮЩИХ ВОЛОКОН И ОДНОНАПРАВЛЕННОГО ЛАМИНАТА ДО РАЗРУШЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

© 2022 г. Н. А. Махутов<sup>а</sup>, Ю. Г. Матвиенко<sup>а</sup>, В. И. Иванов<sup>б</sup>,  
И. Е. Васильев<sup>а,\*</sup>, Д. В. Чернов<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН  
Россия, 101990, Москва, Малый Харитоньевский пер., 4

<sup>б</sup> ЗАО «НИИИИ МНПО Спектр»  
Россия, 119048, Москва, ул. Усачева, 35, стр. 1

\*e-mail: vie01@rambler.ru

Поступила в редакцию 01.10.2021 г.

После доработки 17.10.2021 г.

Принята к публикации 18.10.2021 г.

Проведены испытания по растяжению армирующих волокон композитных материалов и образцов однонаправленного ламината до разрушения с применением акустико-эмиссионной диагностики. Полученные результаты использованы для установления соответствия между разрушениями в структуре полимерного композитного материала на микро-, мезо- и макромасштабном уровнях и регистрируемыми при этом импульсами акустической эмиссии (а.э.), их энергетическими и временными параметрами. Установление таких феноменологических зависимостей дает возможность проводить селекцию регистрируемых импульсов а.э., объединяя их в энергетические кластеры нижнего ( $H$ ), среднего ( $C$ ) и верхнего ( $B$ ) уровней соответственно для микро-, мезо- и макромасштабных разрушений в структуре композитного материала. Контролируя в процессе нагружения изделия перераспределение весового содержания ( $W_i$ ) импульсов а.э. в энергетических кластерах, суммарный уровень которых составляет  $W_H + W_C + W_B = 100\%$ , осуществляют мониторинг накопления повреждений в структуре пакета полимерного композитного материала на разных масштабных уровнях, оценивая остаточную прочность конструкции путем сопоставления текущих значений параметров  $W_i$  с пороговыми [ $W_i^*$ ], регистрируемыми при разрушении материала.

DOI: 10.31857/S003281622202001X

### ВВЕДЕНИЕ

Каждое нарушение структурной связи в полимерном композитном материале (п.к.м.) сопровождается излучением импульсов акустической эмиссии (а.э.), отражающих энергетические и временные характеристики произошедшего разрушения. Поэтому, устанавливая соответствие между происходящими разрушениями в структуре композитного материала на микро-, мезо- и макромасштабном уровнях и регистрируемыми при этом импульсами и их весовым содержанием, получаем возможность контролировать кинетику накопления повреждений в пакете п.к.м. на всех структурных уровнях в режиме нагружения изделия. Установление таких феноменологических зависимостей дает возможность проводить селекцию регистрируемых импульсов а.э., объединяя их в энергетические кластеры нижнего ( $H$ ), среднего ( $C$ ) и верхнего ( $B$ ) энергетических уровней, соответствующие микро-, мезо- и макромас-

штабным разрушениям в структуре композитного материала [1–3]. Контролируя в процессе нагружения изделия перераспределение весового содержания ( $W_i$ ) импульсов а.э.-событий в энергетических кластерах, суммарный уровень которых составляет  $W_H + W_C + W_B = 100\%$ , получаем возможность отслеживать кинетику накопления повреждений на разных структурных уровнях, а следовательно, и остаточную прочность, сопоставляя текущие значения параметров  $W_i$  с пороговыми [ $W_i^*$ ], регистрируемыми при разрушении изделия [4].

Согласно принятой в механике разрушения твердых тел концепции Гриффитса, движущей силой роста трещины является освобождаемая упругая энергия, идущая на создание новой поверхности. Следовательно, чем больше масштаб произошедшего разрушения, тем выше уровень освобождаемой энергии и соответственно значе-

**Таблица 1.** Тип и характеристики испытанных на разрыв волокон

Волокна	Тип (марка)	Характеристики			
		$\phi$ , мкм	$E$ , ГПа	$\sigma_B$ , ГПа	$\epsilon_B$ , %
Углеродные	УКН-М, УК-П, ГЖ, Ровилон, Грапан	6–8	200–235	1.5–3.0	1–2
		5–8	250–450	2.5–5.0	0.6–1.0
Арамидные	Кевлар, Русар, Амос	10–16	100–200	1.5–2.0	2–4

ний энергетических параметров регистрируемых импульсов.

Для селекции регистрируемых импульсов на энергетические кластеры, соответствующие поверхностям разрушений ( $\Omega$ ) на микро-, мезо- и макроуровне в пакете п.к.м., использован параметр относительной энергии  $E_{и}$ , вычисляемый в децибел-микроэлектронвольтах по формуле  $E_{и} = 20\lg(E/E_0)$  [5, 6], который при  $E_0 = 10^{-6}$  эВ равен  $E_{и} = 16 \cdot 10^{-26}$  Дж.

С целью определения границ энергетических кластеров  $H$ ,  $C$ ,  $B$  были проведены испытания на разрушение компонентов структуры пакета п.к.м., в том числе армирующих волокон и образцов однонаправленного ламината. Результаты применения а.э. при испытаниях на разрыв и сжатие образцов композитных материалов с целью мониторинга кинетики накопления повреждений на микро-, мезо- и макромасштабном уровнях изложены в публикациях [1–3]. В настоящей работе рассмотрены эксперименты и представлены результаты испытаний по растяжению армирующих волокон композитных материалов до разрушения. Полученные результаты были использованы для определения границ кластеров нижнего, среднего и верхнего энергетических уровней, соответствующих микро-, мезо- и макромасштабным разрушениям в структуре пакета п.к.м.

### ИСПЫТАНИЯ АРМИРУЮЩИХ ВОЛОКОН П.К.М. НА РАЗРЫВ

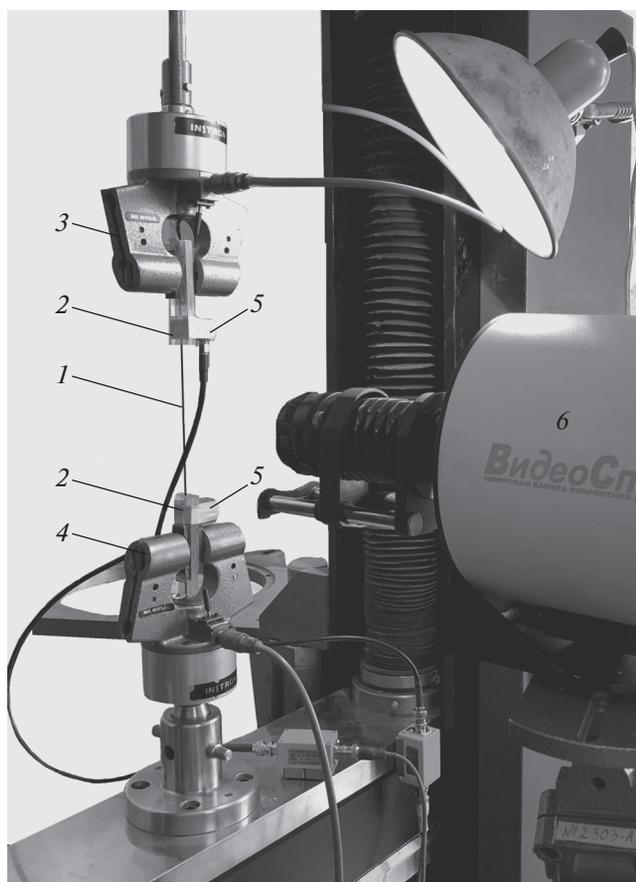
Как известно [5–9], уровень энергии, регистрируемой приемными преобразователями акустической эмиссии (п.а.э.), зависит от типа применяемых п.а.э. (резонансные, полосовые, широкополосные), их чувствительности, параметров канала распространения импульса (в частности, расстояния до источника а.э. и уровня затухания амплитуды в материале изделия, определяемого диссипативными свойствами среды), настроек энергетического канала аппаратуры, в том числе порога дискриминации сигналов ( $u_{и}$ ) и полосы пропускания. При проведении а.э.-диагностики композитных многослойных изделий с высокой анизотропией акустических свойств и, как следствие, интенсивным затуханием импульсов с це-

лью обеспечения надежной локации источников а.э. базовый размер ( $B$ ) локационной решетки устанавливают не более 250 мм. Причем в качестве п.а.э. используют резонансные преобразователи высокой чувствительности, такие как R15 $\alpha$ -SMA (фирмы Mistras, США), а диагностику проводят при уровне порога  $u_{и} = 30$ –42 дБмкВ в полосе пропускания  $\Delta f = 100$ –300 кГц [4, 10].

В рассматриваемых экспериментах на разрыв испытывались как одиночные волокна диаметром 6–16 мкм, так и их скрутки в виде нитей и жгутов толщиной от 15 до 150 мкм, включающих от 3 до 320 волокон [11–13]. В табл. 1 приведены основные характеристики испытанных одиночных волокон, в том числе их диаметр  $\phi$ , модуль упругости при разрыве  $E$ , предел прочности  $\sigma_B$  и относительное удлинение  $\epsilon_B$ .

Для построения графика изменения уровня относительной энергии  $E_{и}$  импульсов а.э. в зависимости от поверхности разрушения  $\Omega$  при испытаниях на разрыв армирующие волокна выбирали с близкими прочностными характеристиками, так чтобы энергия сигналов а.э., регистрируемых при их разрыве, зависела в основном от площади поперечного сечения. Видеосъемка разрыва элементарных волокон, нитей и жгутов осуществлялась высокоскоростной камерой “Видеоспринт” (ООО “УВН технологии”), синхронно с которой для регистрации импульсов а.э.-событий использовались системы акустической эмиссии A-line32D (ООО “Интерюнис-ИТ”), PCI-2 (“Mistras”, США), AMSY-4 (“Vallen”, ФРГ). Регистрация источников а.э.-событий осуществлялась резонансными R15 $\alpha$ -SMA и широкополосными UT-1000 преобразователями фирмы “Mistras” (США). Для регистрации а.э.-событий в низкочастотном диапазоне использовались полосовые преобразователи SNK-06 с резонансной частотой 60 кГц, выпускаемые ООО “Стратегия НК” (РФ), и интегральные преобразователи R6I-AST с резонансной частотой 55 кГц фирмы “Mistras”. Для усиления регистрируемых сигналов указанными п.а.э. использовались соответственно предусилители ПАЭФ-014 производства ООО “Интерюнис-ИТ” и 2-4-6-AST фирмы “Mistras”.

Испытания по разрыву армированных волокон, их нитей и жгутов выполнялись на установке



**Рис. 1.** Испытание на разрыв жгута углеволокна диаметром 140 мкм на установке Instron 34 TM-50. 1 – жгут; 2 – пластинки из оргстекла; 3, 4 – верхний и нижний пневмозахваты; 5 – преобразователи R15α-SMA, 6 – камера “Видеоспринт”.

Instron 34 TM-50 (США) в автоматическом режиме нагружения со скоростью 1 мм/мин. На рис. 1 показан жгут углеволокна в захватах нагружающего стенда.

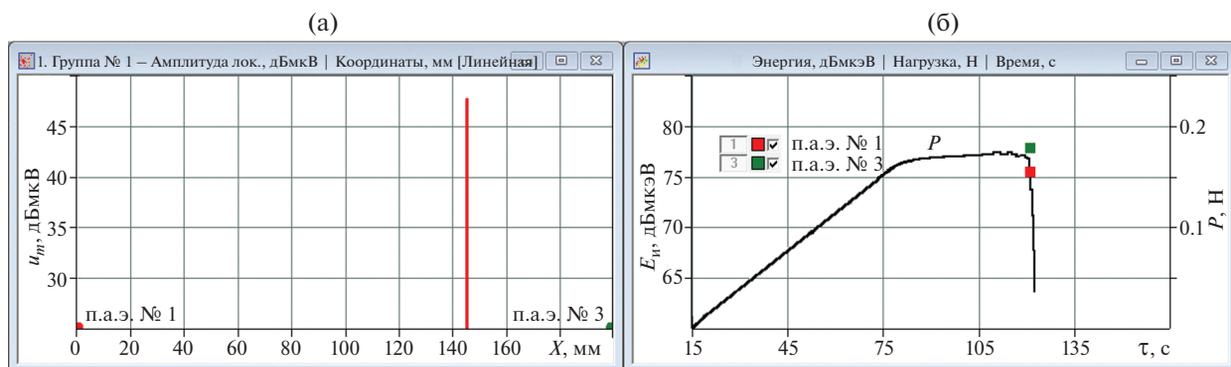
При испытаниях образцы волокон 1 длиной 300 мм помещались между пластинами из оргстекла 2, к одному из концов которых с наружной поверхности с применением изолянты крепились п.а.э. 5. Другой конец пластин зажимался в пневмозахватах 3 и 4 испытательной машины. Расстояние между п.а.э. составляло 200–220 мм. На рис. 2 приведены результаты а.э.-диагностики, зарегистрированные преобразователями R15α-SMA при разрыве углеволокна УКМ-М диаметром 6 мкм.

Как следует из рис. 2б, при повышении уровня растягивающего усилия от 0.15 до 0.17 Н в период нелинейного деформирования волокна до момента его разрыва, произошедшего на 125 с испытания, локации источников а.э. не отмечались. В момент разрыва углеволокна было зарегистрировано одно а.э.-событие на расстоянии 146 мм от п.а.э. № 1. Место разрыва было смещено относительно центра волокна на 46 мм в сторону п.а.э. № 3. При этом максимальная амплитуда импульсов, вычисляемая в децибел-микровольтах по формуле:  $u_m = 20 \lg(u/u_0)$ , при  $u_0 = 1$  мкВ достигала  $u_m = 48$  дБмкВ, а относительная энергия импульсов составляла 78 дБмкэВ. На рис. 3 представлены форма и спектр сигнала а.э., зарегистрированного п.а.э. № 3 в момент разрыва углеволокна диаметром 6 мкм.

На рис. 4 показан кадр разрыва одиночного углеволокна УКМ-М диаметром 6 мкм, зарегистрированный с применением высокоскоростной камеры “Видеоспринт” при скорости съемки 1000 кадров/с.

Следует отметить, что одиночные волокна диаметром меньше 10 мкм зрительно сложно различимы, даже в направленном свете, а их испытание на разрыв с видеосъемкой и синхронной а.э.-диагностикой представляет собой непростую техническую задачу, которая была решена авторами данной работы.

На рис. 5 показаны результаты диагностики а.э.-событий, зарегистрированных локационной



**Рис. 2.** Результаты а.э.-диагностики волокна УКМ-М при испытаниях на разрыв на установке Instron 34 TM-50: а – локационная амплитуда источника а.э.; б – зависимость энергии импульсов а.э. от времени с наложенной кривой нагружения  $P$ .

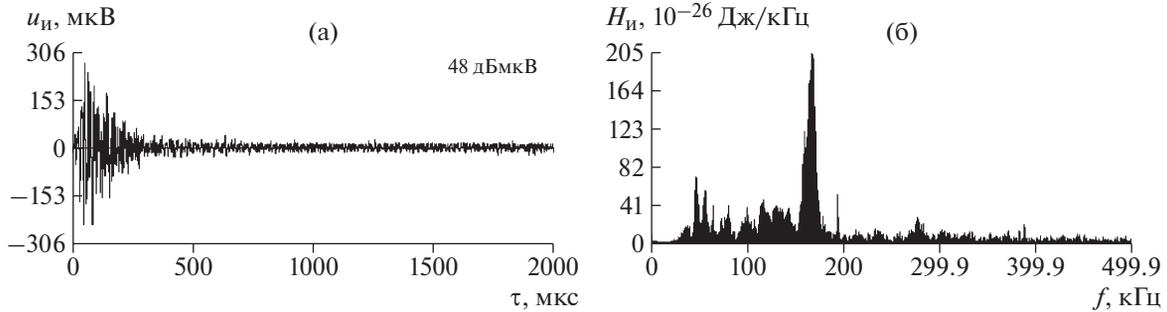


Рис. 3. Форма (а) и спектр (б) импульса а.э., зарегистрированного преобразователем R15α-SMA в момент разрыва волокна УКН-М диаметром 6 мкм.

группой (п.а.э. № 1 и № 2) в процессе непрерывного деформирования нити волокон Кевлар-49 толщиной 60 мкм до момента ее разрыва, произошедшего на 1344 с испытания при величине растягивающей нагрузки  $P = 14.4$  Н.

Как следует из графика на рис. 5а, накопление а.э.-событий наиболее интенсивно происходило на расстоянии 100 мм от п.а.э. № 1, где на 1344 с нагружения произошел разрыв нити Кевлар-49, зажатой в пластинах из оргстекла при расстоянии 220 мм между преобразователями а.э. Наблюдаемый разброс мест индикаций а.э.-событий свидетельствует о том, что по мере растяжения нити регистрировалось разрушение отдельных волокон в интервале  $\Delta X = \pm 25$  мм относительно места предстоящего разрыва. Всего в процессе испытания волокна на разрыв было зарегистрировано 120 а.э.-событий. Причем, как видно из графика на рис. 5б, половина из них была зарегистрирована в течение последних 50 с. Согласно рис. 5в и 5г, импульсы максимальной амплитуды и энергии, достигающих соответственно  $u_m = 90\text{--}100$  дБмкВ и  $E_{и} = 130\text{--}138$  дБмкэВ, вызванные массовым разрывом волокон, регистрировались при повышении нагрузки свыше 10 Н в течение 1050–1344 с нагружения. На рис. 6 показаны форма и спектр сигнала а.э., зарегистрированного п.а.э. № 1 в момент разрыва нити Кевлар-49.

На рис. 7 показан кадр разрыва нити Кевлар-49 диаметром 60 мкм, зарегистрированный с применением высокоскоростной камеры “Видеоспринт” при скорости съемки 1000 кадров/с.

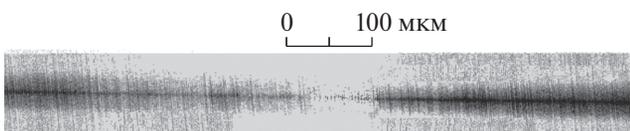


Рис. 4. Кадр разрыва одиночного углеволокна УКН-М диаметром 6 мкм, зарегистрированный с применением высокоскоростной камеры “Видеоспринт” при скорости съемки 1000 кадров/с.

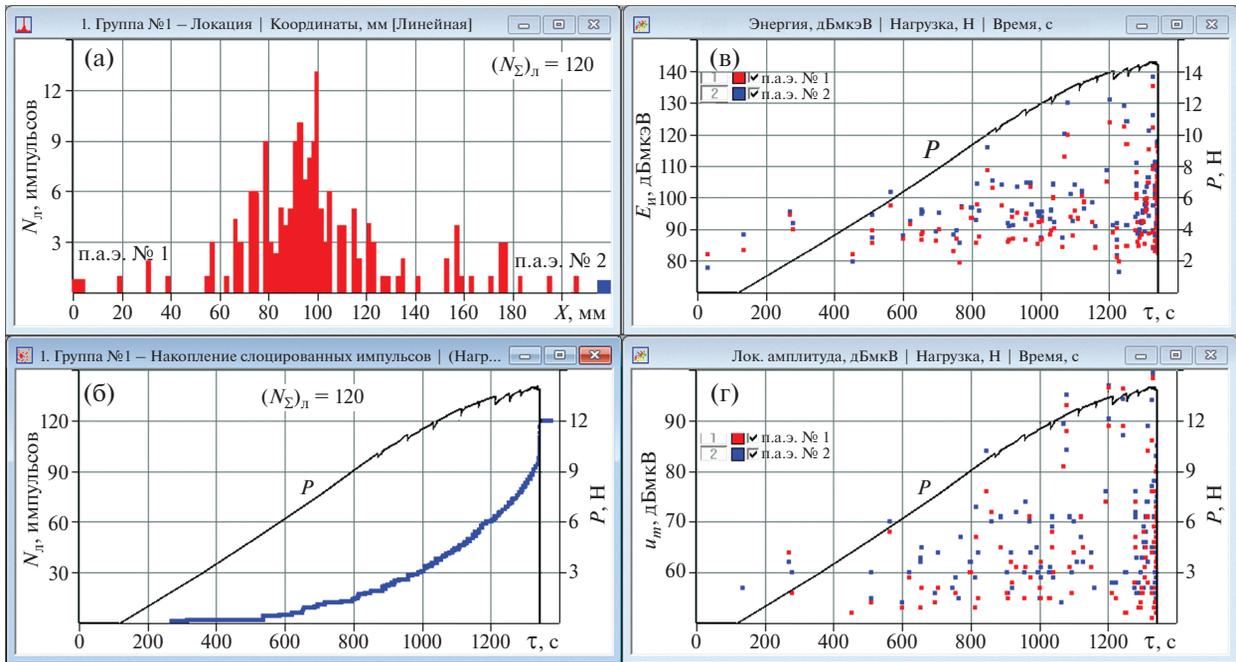
На основании результатов испытаний образцов армирующих волокон и нитей на разрыв, а также их статистической обработки на рис. 8 построены графики логарифмических зависимостей изменения максимальной энергии  $E_{и}$  регистрируемых импульсов и уровня ее разброса  $\eta$  в интервале  $\pm 2S$  (среднего квадратичного отклонения) от площади поперечного сечения  $\Omega$  испытанных образцов (рис. 8).

Как следует из рис. 8, при увеличении толщины волокон и нитей от 5 до 80 мкм, а их сечений от 20 до 5024 мкм<sup>2</sup> максимальная энергия регистрируемых импульсов а.э. возросла от 64 до 144 дБмкэВ. При этом уровень разброса  $\eta$  регистрируемых параметров, подсчитанный по результатам статистической обработки выборок испытаний в интервале  $\pm 2S$ , снижился с 19 до 1%, т.е. был достаточно низким, что свидетельствует о достоверности полученных результатов.

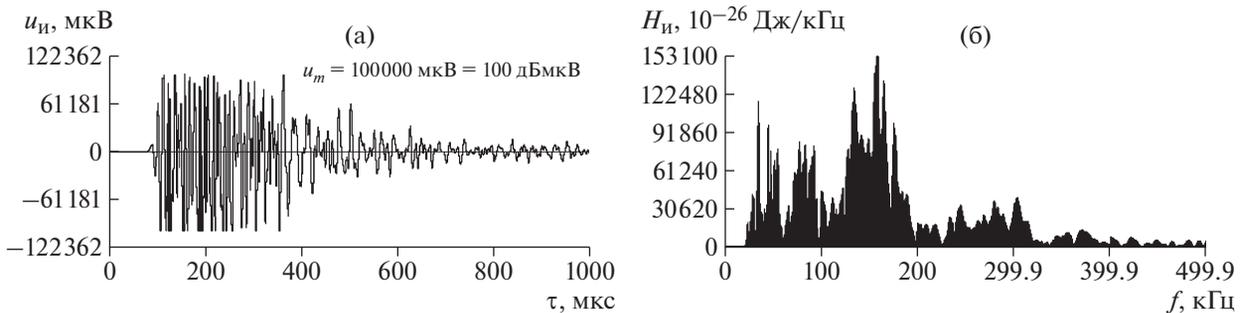
#### ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО ЛАМИНАТА НА РАЗРЫВ

В ходе испытания на разрыв образцов однонаправленного ламината [1, 2] видеосъемка микро-разрушений в структуре пакета п.к.м. осуществлялась синхронно с регистрацией импульсов а.э. в процессе повышения нагрузки. На рис. 9–11 приведены кадры видеосъемки фрагментов типичных повреждений структуры однонаправленного ламината на микро-, мезо- и макромасштабном уровнях, фиксируемые на характерных стадиях  $\tau_0\text{--}\tau_2$  деформирования пакета п.к.м., размеры поверхности разрушений  $\Omega_{и}$ , а также формы и параметры синхронно регистрируемых при этом импульсов а.э.

На начальной стадии  $\tau_0$  нагружения ламината растягивающей нагрузкой, когда соотношение деформаций  $j = \epsilon_1/\epsilon_B$  не превышает 20%, т.е. материал находится в условиях упругого деформирования, преимущественно регистрируются сигналами



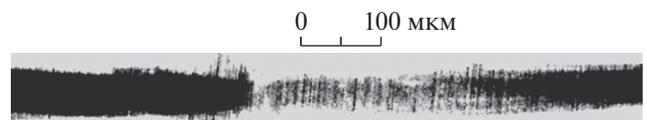
**Рис. 5.** Результаты а.э.-диагностики нити Кевлар-49 толщиной 60 мкм, зарегистрированные на 1344 с испытания на разрыв: а – линейная локация источников а.э.; б – количество локационных импульсов в зависимости от времени с наложенной кривой нагружения  $P$ ; в – энергия импульсов а.э. в зависимости от времени с наложенной кривой нагружения  $P$ ; г – амплитуда локационных импульсов в зависимости от времени с наложенной кривой нагружения  $P$ .



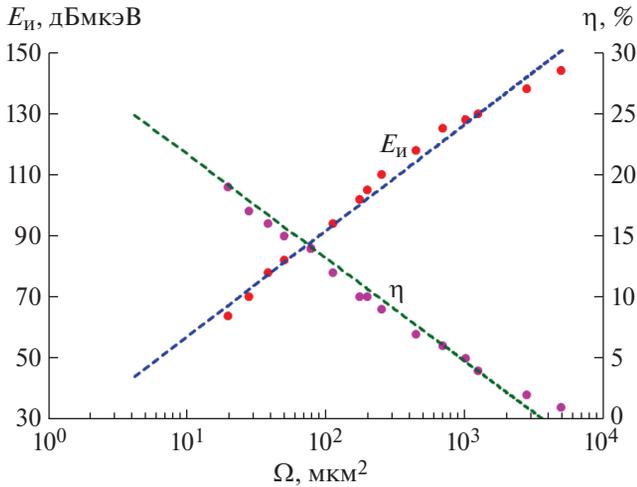
**Рис. 6.** Форма (а) и спектр (б) импульса а.э., зарегистрированного преобразователем R15 $\alpha$ -SMA в момент разрыва образца нити Кевлар-49 диаметром 60 мкм.

лы, относящиеся к нижнему кластеру со следующими значениями параметров: относительная энергия  $E_{и} = 60\text{--}88$  дБмкэВ, максимальная амплитуда  $u_m = 30\text{--}55$  дБмкВ, длительность  $t_{и} \leq 500$  мкс. Источники генерации таких импульсов, как показано на рис. 9, возникают в результате микроповреждений структурных связей в слоях пакета п.к.м. с поверхностью разрушения  $\Omega_H < 100$  мкм<sup>2</sup>, вызванных локальными микроотслаиваниями связующего вещества от армирующих волокон при распрямлении последних, зарождением и развитием микротрещин в структуре матриц и на границах скрепления слоев.

При повышении соотношения  $j$  от 20 до 70% на стадии  $\tau_1$  активно регистрируются сигналы, относящиеся к среднему кластеру, которые имеют следующие значения параметров: относитель-



**Рис. 7.** Кадр разрыва нити Кевлар-49 диаметром 60 мкм, зарегистрированный с применением высокоскоростной камеры “Видоспринт” при скорости съемки 1000 кадров/с.



**Рис. 8.** Изменение максимальной энергии регистрируемых импульсов  $E_{и}$  и уровня ее разброса  $\eta$  в интервале  $\pm 2S$  в зависимости от площади поперечного сечения  $\Omega$  испытанных волокон и нитей.

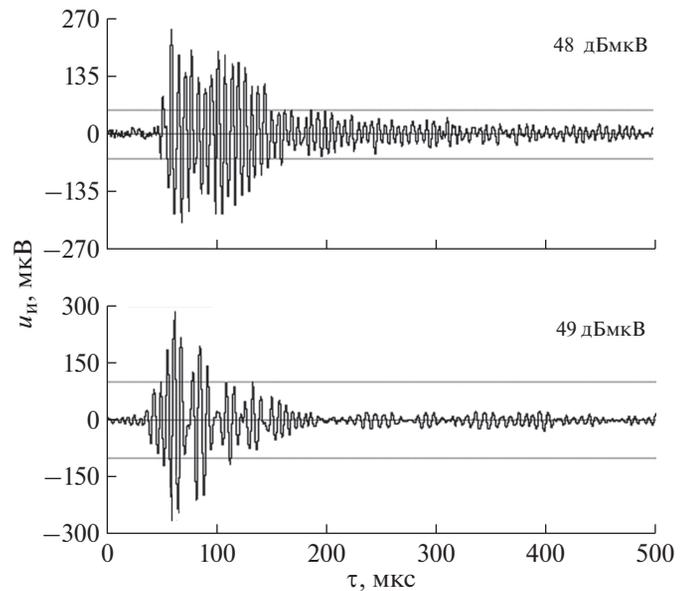
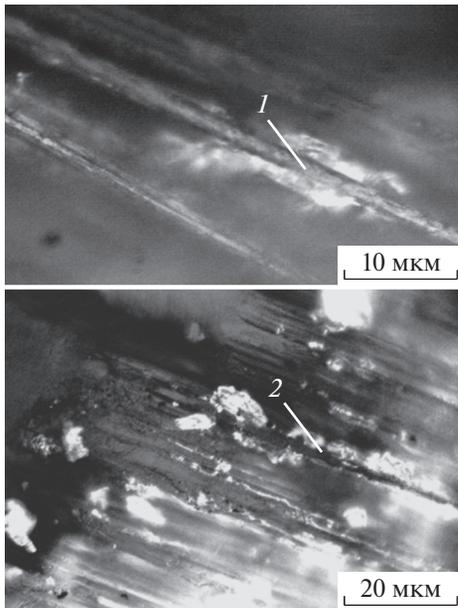
ная энергия  $E_{и} = 90\text{--}120$  дБмкЭВ, максимальная амплитуда  $u_m = 60\text{--}85$  дБмкВ, длительность  $t_{и} = 500\text{--}1500$  мкс. Источники генерации таких импульсов могут быть отнесены к мезоструктурным повреждениям в пакете п.к.м. с поверхностью разрушения  $\Omega_C = 100\text{--}1000$  мкм<sup>2</sup>, возникающим при распространении трещин в матрицах слоев,

разрыве армирующих волокон, их вырывании из связующего (см. рис. 10).

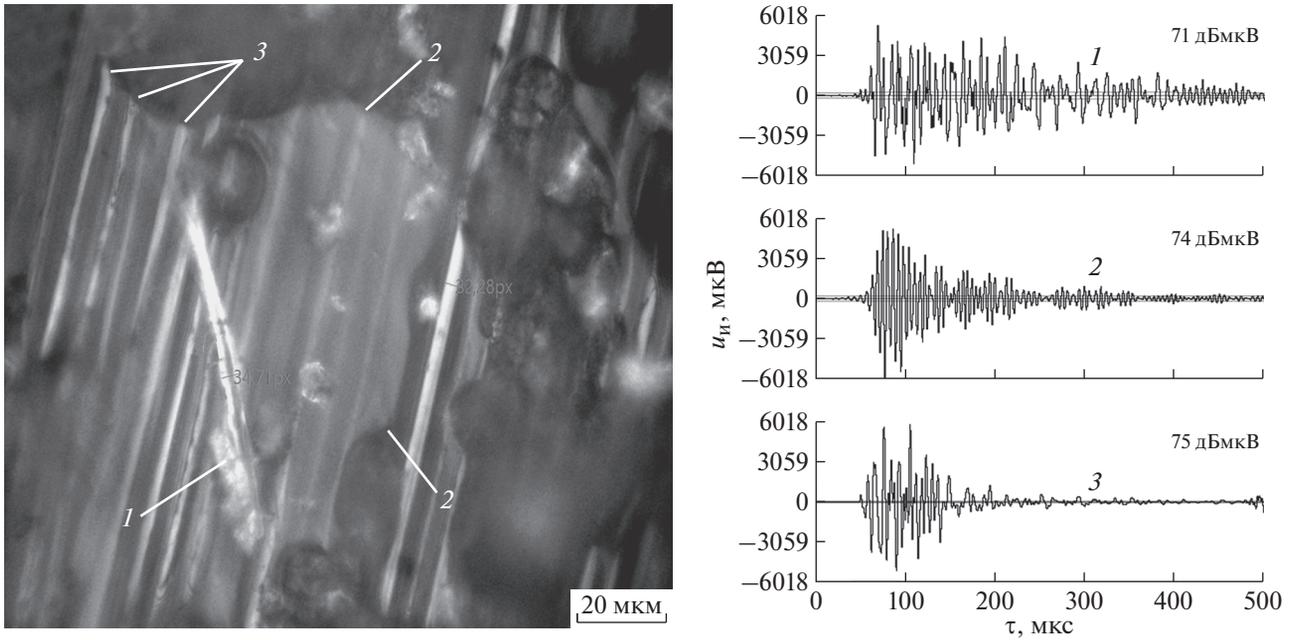
На стадии нагружения  $\tau_2$  при повышении соотношения  $j$  в диапазоне 70–100%, наряду с импульсами нижнего и среднего энергетических уровней, наблюдается заметный рост активности регистрации импульсов а.э., относящихся к верхнему кластеру с уровнем относительной энергии  $E_{и} = 120\text{--}145$  дБмкЭВ, с максимальной амплитудой  $u_m = 85\text{--}110$  дБмкВ и длительностью  $t_{и} \geq 1500$  мкс. Источники генерации таких импульсов могут быть отнесены к макроструктурным повреждениям с поверхностью разрушения  $\Omega_B > 1000$  мкм<sup>2</sup>, возникающим в результате массового разрыва волокон, нарушения адгезии, деламинации и разрыва слоев (см. рис. 11).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

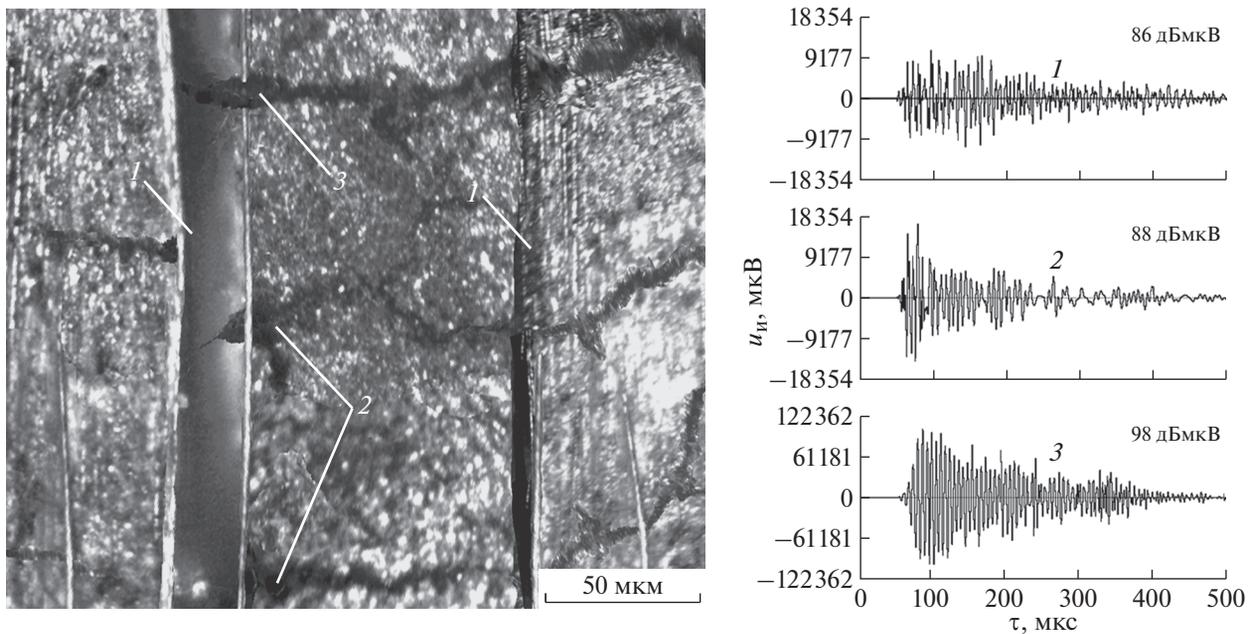
На основании экспериментальных данных, полученных при испытаниях на разрыв армирующих волокон и нитей композитных материалов (см. рис. 8), а также разрушений структурных связей однонаправленного ламината (см. рис. 9–11), в поле параметров относительной энергии и максимальной амплитуды ( $E_{и}$ ,  $u_m$ ) сигналов а.э. были определены границы энергетических кластеров  $H$ ,  $C$  и  $B$ , соответствующие микро-, мезо- и макро масштабным разрушениям в пакете п.к.м., выделенные разным цветом на рис. 12.



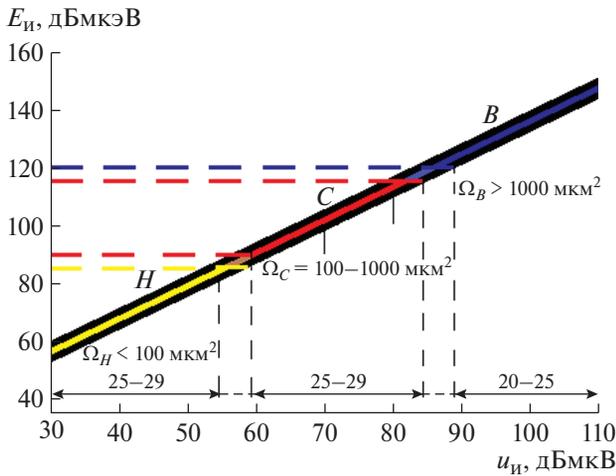
**Рис. 9.** Слева – типичные микроповреждения на стадии  $\tau_0$  в виде отслаивания связующего вещества на границе скрепления с армирующими волокнами (1) и образования микротрещин (2) с поверхностью разрушения  $\Omega_H < 100$  мкм<sup>2</sup>; справа – синхронно регистрируемые формы импульсов а.э.



**Рис. 10.** Слева – типичные мезоповреждения на стадии  $\tau_1$  в виде выдергивания из связующего армирующих волокон (1), образования трещин различной направленности в матрицах слоев (2), разрыва волокон (3) с поверхностью разрушения  $\Omega_C = 100\text{--}1000 \text{ мкм}^2$ ; справа – синхронно регистрируемые формы соответствующих импульсов а.э. (1–3).



**Рис. 11.** Слева – типичные макроповреждения на стадии  $\tau_2$  в виде расслаивания пакета ламината (1), образования магистральных трещин (2) и разрыва слоев (3) с поверхностью разрушения  $\Omega_B > 1000 \text{ мкм}^2$ ; справа – синхронно регистрируемые формы импульсов (1–3).



**Рис. 12.** Границы кластеров нижнего ( $H$ ), среднего ( $C$ ) и верхнего ( $B$ ) энергетических уровней локационных импульсов, установленные в поле параметров относительной энергии ( $E_{и}$ ) и амплитуды ( $u_{и}$ ), соответствующие микро- ( $\Omega_H$ ), мезо- ( $\Omega_C$ ) и макроразрушениям ( $\Omega_B$ ) в пакете п.к.м.

Построенная по экспериментальным данным зависимость  $E_{и} = f(u_{и})$  отображает соответствие между регистрируемой энергией и максимальной амплитудой сигнала а.э. в измеряемом диапазоне значений  $u_{и} = 30\text{--}110$  дБмкВ локационных импульсов:

$$E_{и} \sim 1.12u_{и} + 24.5. \quad (1)$$

Штриховыми линиями и цветом на графике отмечены переходные зоны, в которых значения энергии и амплитуды регистрируемых импульсов могут быть отнесены к поверхностям разрушения смежных энергетических кластеров, зависящих от настроек а.э.-системы: в частности, если уровень порога будет  $>30$  дБмкВ и (или) полоса пропускания цифровых фильтров урезана относительно  $\Delta f = 30\text{--}500$  кГц.

В табл. 2 приведены обобщенные результаты исследований, включающие величину поверхности разрушения структурных связей композитного материала на микро-, мезо-, макромасштабном уровнях, значения относительной энергии и амплитуды импульсов а.э., регистрируемых при

испытаниях однонаправленного ламината [1, 2] и армирующих волокон на разрыв.

Приведенные на рис. 8 и 12, а также в табл. 2 экспериментальные данные были получены с применением резонансных преобразователей R15 $\alpha$ -SMA и акустико-эмиссионной системы A-line32D при уровне порога дискриминации  $u_{th} = 30$  дБмкВ и полосе пропускания цифровых фильтров  $\Delta f = 30\text{--}500$  кГц. При использовании п.а.э. других типов, в том числе UT-1000, R6I-AST, SNK-06 и систем а.э.-диагностики PCI-2, AMSY-4, применявшихся в ходе проводимых экспериментов по разрыву волокон и однонаправленного ламината, графики зависимостей  $E_{и} = f(\Omega)$  и  $E_{и} = f(u_{и})$  несколько отличались, хотя их общий тренд, представленный на рис. 8 и рис. 12, совпадал.

Наибольшее внимание, уделенное авторами экспериментальным исследованиям по разрыву армирующих волокон с применением преобразователей R15 $\alpha$ -SMA и акустико-эмиссионной системы A-line32D, обусловлено тем, что именно эта аппаратура наиболее часто используется при проведении а.э.-диагностики конструкций в ходе стендовых испытаний изделий из п.к.м.

## ВЫВОДЫ

1. В ходе проведенных экспериментальных исследований по разрыву однонаправленного ламината и армирующих волокон композитных материалов в поле параметров относительной энергии и максимальной амплитуды импульсов ( $E_{и}$ ,  $u_{и}$ ) были установлены границы нижнего, среднего и верхнего энергетических кластеров, соответствующих микро-, мезо- и макромасштабным разрушениям в пакете п.к.м. (см. табл. 2 и рис. 12). К микромасштабным повреждениям были отнесены разрушения в структуре пакета п.к.м., поверхность которых не превышала  $100$  мкм<sup>2</sup>, к мезомасштабным – составляла  $100\text{--}1000$  мкм<sup>2</sup>, а к макромасштабным – превышала  $1000$  мкм<sup>2</sup>.

2. Установлено соотношение (1) между уровнем относительной энергии и максимальной амплитудой импульсов а.э., регистрируемых с применением преобразователей R15 $\alpha$ -SMA, согласно которому при уровне порога  $u_{th} = 30$  дБмкВ и полосе  $\Delta f = 30\text{--}500$  кГц к нижнему кластеру могут

**Таблица 2.** Поверхности разрушений ( $\Omega$ ) композитного материала на микро-, мезо- и макромасштабном уровнях и соответствующие им значения энергии ( $E_{и}$ ) и амплитуды ( $u_{и}$ ) локационных импульсов

Масштаб разрушения	$\Omega$ , мкм <sup>2</sup>	Параметры регистрируемых импульсов а.э.	
		$E_{и}$ , дБмкэВ	$u_{и}$ , дБмкВ
Микро	$< 100$	$< 90$	$< 60$
Мезо	$100\text{--}1000$	$90\text{--}119$	$60\text{--}85$
Макро	$> 1000$	$\geq 120$	$> 85$

быть отнесены сигналы с уровнем максимальной амплитуды  $u_m = 30\text{--}59$  дБмкВ и относительной энергией  $E_{\text{и}} = 55\text{--}89$  дБмкэВ, к среднему кластеру – с  $u_m = 60\text{--}85$  дБмкВ и  $E_{\text{и}} = 90\text{--}119$  дБмкэВ, к верхнему кластеру – с  $u_m > 85$  дБмкВ и  $E_{\text{и}} \geq 120$  дБмкэВ.

3. Исходя из приведенной на рис. 8 зависимости  $E_{\text{и}} = f(\Omega)$ , построенной по данным, полученным при разрыве армирующих волокон композитных материалов, минимальная поверхность разрушения, при которой с применением преобразователей R15 $\alpha$ -SMA при уровне порога  $u_{\text{th}} = 30$  дБмкВ и полосе пропускания  $\Delta f = 30\text{--}500$  кГц возможна регистрация импульсов а.э. с погрешностью порядка 20% в интервале  $\pm 2S$ , должна быть не менее 10 мкм<sup>2</sup>, что соответствует толщине волокна порядка 3.6 мкм. Полученные значения достаточно хорошо коррелируют с результатами, приведенными в публикациях [14–16].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили разработать алгоритм и программное обеспечение для системы сбора и обработки а.э.-данных [1–4]. Это дало возможность в процессе а.э.-диагностики исследуемых изделий из композитных материалов осуществлять кластерную селекцию регистрируемых импульсов в поле параметров относительной энергии и максимальной амплитуды. Контроль в процессе нагружения изделия изменения весового содержания и активности импульсов а.э.-событий в энергетических кластерах позволяет осуществлять мониторинг кинетики накопления повреждений в структуре пакета п.к.м. на всех масштабных уровнях, а следовательно, проводить оценку остаточной прочности диагностируемой конструкции, сопоставляя текущие значения критериальных параметров  $W_i$  с пороговыми  $[W_i]$ , регистрируемыми при разрушении материала.

Разработанные концепция, алгоритм и программное обеспечение мониторинга накопления повреждений на всех масштабных уровнях и оценка остаточной прочности изделий в режиме их нагружения были апробированы при испытаниях партий образцов и изделий из п.к.м. в условиях воздействия различного вида нагрузок [1–4, 17].

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 20-19-00769).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. № 11. С. 45. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-11-45-61>
2. Matvienko Y.G., Vasil'ev I.E., Chernov D.V. // Acta Mechanica. 2021. V. 232. P. 1889. <https://doi.org/10.1007/s00707-020-02866-6>
3. Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. № 4. С. 45. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2021-87-4-61-70>
4. Васильев И.Е., Матвиенко Ю.Г., Чернов Д.В., Елизаров С.В. // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2020. № 2. С. 118.
5. Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика. М.: Спектр, 2017.
6. Бигус Г.А., Даниев Ю.Ф., Быстрова Н.А., Галкин Д.И. Основы диагностики технических устройств и сооружений. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015.
7. Ono K., Gallego A. Research and Applications of AE on Advanced Composites. Acoustic Emission. Springer Handbook of Acoustics / Eds. T.D. Rossing. NY.: Springer, 2014. P. 1209–1229.
8. Ono K. // J. Sensor. 2019. V. 19. № 7. P. 3129. <https://doi.org/10.3390/s19143129>
9. Ono K. // Applied Sciences. 2019. V. 9(21). P. 4602. <https://doi.org/10.3390/app9214602>
10. Sause M.G.R. In Situ Monitoring of Fiber-Reinforced Composites. Springer Series in Materials Science. Springer, 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-30954-5>
11. Каталог продукции предприятий Холдинговой компании “Композит”. М.: АО “Холдинговая компания “Композит”, 2010.
12. Иванов Д.А., Ситников А.И., Шляпин С.Д. Дисперсноупрочненные волокнистые и слоистые неорганические композиционные материалы / Под ред. А.А. Ильина. М.: Изд.-во МГИУ, 2010.
13. Афанасов И.М., Лазорак Б.И. Высокотемпературные керамические волокна. Уч. пособие. М.: Изд-во МГУ, 2010.
14. Терентьев А.Д., Иванов В.И. // В мире НК. 2021. Т. 24. № 1. С. 42.
15. Brunner A.J. // Proc. 32nd European Conference on Acoustic Emission Testing. (Prague, Czech Republic, September 07–09) Czech Society for Nondestructive Testing, 2016. P. 55.
16. Baensch F., Zauner M., Sanabria S.J., Sause M.G.R., Pinzer B.R., Brunner A.J., Stamparoni M., Niemz P. // Holzforschung. 2015. V. 69(8). P. 1015. <https://doi.org/10.1515/hf-2014-0152>
17. Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Панков В.А. // Дефектоскопия. 2019. № 8. С. 24. <https://doi.org/10.1134/S0130308219080037>