

# ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ И ХАРАКТЕРИЗАЦИИ ПРЕДВЕСТНИКОВ ТОТАЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЧНОСТИ

Рыжова Т.Б.<sup>1\*</sup>, Петронюк Ю.С.<sup>2\*\*</sup>, Мороков Е.С.<sup>2\*\*\*</sup>, Гулевский И.В.<sup>1\*\*\*\*</sup>,  
Левин В.М.<sup>2\*\*\*\*\*</sup>, Шаныгин А.Н.<sup>1\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> Центральный аэрогидродинамический институт

им. профессора Н.Е. Жуковского (ЦАГИ),

ул. Жуковского, 1, Жуковский, Московская область, 140180, Россия

<sup>2</sup> Институт биохимической физики имени Н.М. Эмануэля РАН (ИБХФ РАН),

ул. Косыгина, 4, Москва, 117997, Россия

\* e-mail: tatyana.ryzhova@tsagi.ru, istctbr@mail.ru

\*\* e-mail: jps7@mail.ru

\*\*\* e-mail: es\_morokov@yahoo.com

\*\*\*\* e-mail: gulevsky@tsagi.ru

\*\*\*\*\* e-mail: levin1943@gmail.ru

\*\*\*\*\* e-mail: alexander.shanygin@tsagi.ru

Статья поступила в редакцию 20.07.2020

Представлены результаты экспериментального исследования процесса разрушения толстого слоистого углепластика с укладкой  $[0^\circ/90^\circ]_{4S}$  при одноосном растяжении и трехточечном изгибе. Выявлены и описаны типы повреждений внутренней структуры углепластика, являющиеся предвестниками тотального разрушения. Оценена длительность процессов накопления повреждений до полного разрушения ламината при растяжении и изгибе. Повышение информативности прочностных исследований достигнуто с помощью применения комбинации акустических методов — акустической эмиссии и акустической микроскопии.

*Ключевые слова:* слоистый углепластик, растяжение, трехточечный изгиб, накопление повреждений, предвестники разрушения, акустические методы.

## Введение

Особенностью разрушения композиционных материалов (КМ) на основе полимерного связующего является многоочаговое образование повреждений микроструктуры материала при внешних воздействиях, их развитие и слияние, приводящие к разрушению изделия. Результаты многочисленных исследований повреждаемости слоистых углепластиков [1—7], широко применяемых в конструкциях ответственного назначения, пока не позволили сформировать ясное понимание механизмов многоуровневого (от микро- до макроуровня) разрушения таких материалов и создать надежные прогностические модели прочности. Одной из причин, сдерживающих создание надежных прогностических моделей, является крайняя

ограниченность инструментальных средств, позволяющих характеризовать повреждения объемной структуры в ходе экспериментальных исследований прочности.

В практике различных испытаний КМ и изделий из них широко применяется метод акустической эмиссии (АЭ), позволяющий осуществлять непрерывный мониторинг состояния исследуемого изделия и регистрировать параметры внешнего воздействия, при которых начинается необратимое повреждение внутренней структуры материала. Однако этот метод не позволяет характеризовать образовавшиеся повреждения. Имеются работы, в которых предлагается использовать параметры принятых сигналов АЭ для идентификации повреждений. Например, анализировались

частоты АЭ сигналов [8], полученных при испытании на растяжение специальных образцов однонаправленных углепластиков, разработанных для получения разрушений определенной моды. При испытаниях на трехточечный изгиб слоистого углепластика [9] были выделены три стадии процесса нагружения и на основе обработки АЭ сигналов сделано заключение о доминирующих повреждениях структуры на каждой стадии. В приведенных выше и ряде других работ соответствие типов повреждений, определенных по параметрам АЭ, реальным повреждениям структуры определялось либо по поверхности образцов, либо после разрушения по изломам методами классической микроскопии [8—11].

При исследовании прочности и изучении механизмов разрушения изделий из различных материалов часто используют комбинацию АЭ с другими методами неразрушающих исследований для описания повреждений структуры. Для локализации образовавшихся повреждений применяются традиционные методы неразрушающего контроля (ультразвуковой, тепловой, рентгеновский и др.), но они не позволяют выявлять и описывать повреждения структуры КМ на микроуровне. Применение метода рентгеновской компьютерной томографии (КТ) для исследования композиционных материалов может быть затруднено в силу технических причин, включая низкий контраст, особенности структуры и геометрии образца и др. [12]. Микроповреждения внутренней структуры углепластиков могут надежно выявляться с помощью современных рентгеновских микротомогра-

фов ( $\mu\text{CT}$ ). Однако ограничение по размерам исследуемого образца ( $10\text{--}20\text{ мм}^3$ ) существенно сужает области применения микротомографов для изучения механизмов разрушения композиционных материалов при внешних воздействиях.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований процессов разрушения слоистого углепластика с укладкой  $[0^\circ/90^\circ]_{4S}$  при нагружении на растяжение и трехточечный изгиб. Испытания сопровождались непрерывным мониторингом целостности структуры методом АЭ. Описание и оценка повреждений внутренней структуры углепластика (от микро- до макроуровня) осуществлялись неразрушающим ультразвуковым методом высокого разрешения — акустической микроскопией (АМ).

Комбинация неразрушающих акустических методов позволила определить параметры нагружения, при которых происходит образование и рост необратимых повреждений внутренней микроструктуры слоистого углепластика при растяжении и изгибе, оценить длительность накопления повреждений до разрушения, а также выявить и описать типы повреждений, являющихся предвестниками тотального разрушения.

## 1. Материал и образцы

Образцы были вырезаны из панели, изготовленной по технологии препрега (M21/35%/268/T700GC, Hexcel). Характеристики материала приведены в табл. 1. Толщина слоя ламината составляла 270 мкм (16 слоев), толщина образца 4,32 мм, укладка  $[0^\circ/90^\circ]_{4S}$ .

Таблица 1

Характеристики монослоя материала M21/35%/268/T700GC

Модуль упругости вдоль волокон, кгс/мм <sup>2</sup>	15080,0
Модуль упругости поперек волокон, кгс/мм <sup>2</sup>	1220,0
Модуль сдвига, кгс/мм <sup>2</sup>	480,0
Коэффициент Пуассона (при нагружении вдоль волокон)	0,35
Толщина монослоя, мм	0,27
Разрушающие напряжения	
При растяжении вдоль волокон, кгс/мм <sup>2</sup>	236,0
При сжатии вдоль волокон, кгс/мм <sup>2</sup>	149,0
При растяжении поперек волокон, кгс/мм <sup>2</sup>	6,1
При сжатии поперек волокон, кгс/мм <sup>2</sup>	18,3
При сдвиге, кгс/мм <sup>2</sup>	9,7
Плотность материала, г/см <sup>3</sup>	1,5

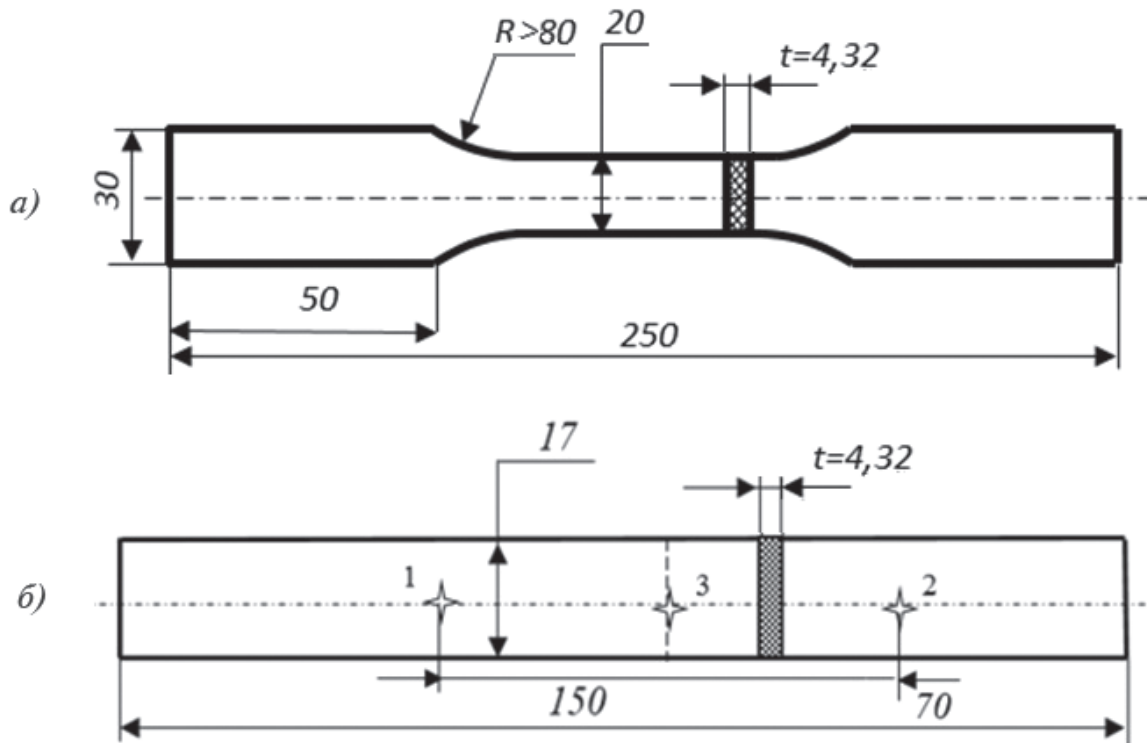


Рис. 1. Эскизы образцов на растяжение (а) и трехточечный изгиб (б)

На рис. 1 представлены эскизы образцов для испытаний на растяжение и трехточечный изгиб, изготовленные в соответствии с рекомендациями ГОСТов [13–15].

## 2. Экспериментальные исследования

Испытания образцов на растяжение и трехточечный изгиб проводили на испытательной машине LFM-TOP50 (WALTER&BAI, Швейцария). Квазистатическое нагружение осуществляли ступенчато. Влияние растяжения и изгиба на внутреннюю структуру образцов изучали путем сравнения акустических изображений, полученных методом акустической микроскопии до испытаний, в процессе испытаний и после разрушения образцов. Исследования внутренней структуры в процессе испытаний проводили по показаниям акустической эмиссии. При испытании образцов были получены данные по нагрузке, деформации/прогибу и параметрам АЭ.

### 2.1. Испытание на растяжение

Целью эксперимента было исследование повреждений внутренней структуры углепластика при растяжении и определение деформации, при которой начинается формирование и рост необратимых повреждений в материале по показаниям

АЭ; выявление и описание повреждений внутренней структуры с помощью акустических изображений. Процедура эксперимента состояла из ступенчатого нагружения с шагом по деформации ( $\Delta\varepsilon = 0,05\%$ ) до полного разрушения образца.

### 2.2 Испытание на трехточечный изгиб

Цель испытания — экспериментальное изучение процесса повреждения слоистого углепластика при деформациях изгиба; определение прогиба, приводящего к необратимым повреждениям в структуре образца, выявление и описание необратимых повреждений, образовавшихся в зонах растяжения и сжатия, сравнение повреждений в растянутой зоне при изгибе и при одноосном растяжении.

Процедура эксперимента состояла из ступенчатого нагружения образца с шагом по прогибу образца ( $\Delta = 0,1$  мм). Для уменьшения влияния инерции при остановках скорость перемещения активного захвата была выбрана равной 1 мм/мин. При устойчивом росте параметров АЭ была произведена разгрузка образца для исследования состояния внутренней структуры углепластика методом АМ. Далее испытания были продолжены до разрушения образца.

### 3. Неразрушающие методы исследований

#### 3.1. Метод акустической эмиссии

Принципы метода акустической эмиссии описаны в [16—18]. Особенности метода заключаются в том, что источником сигнала АЭ служит сам материал, а метод обнаруживает развивающиеся дефекты и повреждения, а не статические неоднородности. Причиной возникновения акустических волн в материале являются процессы перераспределения напряжений в объеме материала под действием внешних факторов, совершения работы по разрушению внутренних связей (разрушению структуры материала) и высвобождения энергии в виде волн напряжений. Акустические волны регистрируются с помощью АЭ-преобразователей, установленных на поверхности изделия. Анализ зарегистрированных сигналов позволяет получить информацию о факте изменений во внутренней структуре и развитии повреждений в процессе нагружения изделия.

Для непрерывного АЭ-мониторинга структуры образцов в процессе испытаний использовалась акустико-эмиссионная система DISP-8 с акустическим преобразователем R30 (Physical Acoustics corp., США). Основные параметры аппаратуры в эксперименте: частотный диапазон преобразователя 100—300 кГц, порог чувствительности 40 дБ. В разделе «Результаты исследований и обсуждение» приведены временные графики энергии АЭ при нагружении образца на растяжение и трехточечный изгиб.

#### 3.2. Метод акустической микроскопии

В основе метода сканирующей акустической микроскопии лежит зондирование образца сфокусированным пучком высокочастотного ультразвука (более 50 МГц). Модификации метода АМ с импульсным возбуждением сигнала наиболее эффективны при исследовании объемной микроструктуры материалов [19, 20]. Диаметр фокального пятна высокочастотных акустических линз с небольшой угловой апертурой составляет несколько десятков микрометров. Зондирующий импульс малой длительности обеспечивает высокое разрешение по толщине объекта наблюдения. Слоистые углепластики, исследованию которых посвящена данная работа, состоят из ориентированных определенным образом углеродных волокон и нитей, уложенных в слои толщиной 250—270 мкм. Такие структуры воспринимаются высокочастотным ультразвуком как система анизотропных слоев, на границах которых ультразвуко-

вое излучение испытывает отражение. Это позволяет визуализировать структурные составляющие ламината (слои, пучки углеродных волокон и др.), выявлять технологические несовершенства и дефекты внутренней структуры, а также ее повреждения, образовавшиеся в результате воздействия внешних факторов как внутри отдельного слоя, так и в объеме материала.

Исследование состояния внутренней структуры образцов проводили с помощью сканирующего импульсного акустического микроскопа (СИАМ-2011, ИБХФ РАН). Применение акустических линз с рабочими частотами 50 и 100 МГц, угловой апертурой 11° обеспечило разрешающую способность при визуализации исследуемых углепластиков порядка 50 и 100 мкм соответственно. Длительность зондирующих импульсов 25—40 нс была меньше временной задержки между импульсами (150 нс), отраженными от границ слоев в ламинате. Это позволило разделять регистрируемые эхо-сигналы от повреждений и границ слоев ламината. Результаты исследования представлены в виде последовательностей акустических изображений с некоторым шагом по глубине (С-сканы), а также в виде поперечных сечений образца (В-сканы).

### 4. Результаты исследований и обсуждение

#### 4.1. Испытание на растяжение

Образец слоистого ламината  $[0^\circ/90^\circ]_{4S}$  разрушился при деформации  $\epsilon = 1,11\%$ . Максимальная нагрузка составила 63,97 кН, нормальные напряжения в контролируемой зоне соответствовали 75,47 кгс/мм<sup>2</sup>. Данные по полученным прочностным характеристикам образца представлены в табл. 2.

На рис. 2 представлена кривая нагружения ламината  $[0^\circ/90^\circ]_{4S}$ . Кривая растяжения исследу-

Таблица 2

Экспериментальные данные по предельным прочностным характеристикам слоистого ламината (M21/35%/268/T700GC)

Описание	Результат
Ширина×толщина (Ш×Т)	20,00×4,32 мм
Начальное сечение ( $S_0$ )	86,40 мм <sup>2</sup>
Е-модуль (E)	67,18 ГПа
Предел прочности (Rm)	740,39 МПа
Максимальная нагрузка (Fm)	63,97 кН
Деформация при разрушении (At)	1,11%

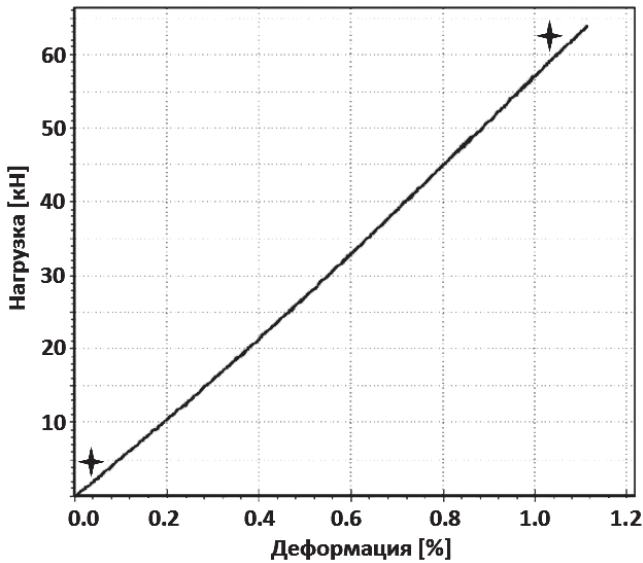


Рис. 2. Кривая нагружения слоистого углепластика  $[0^\circ/90^\circ]_{4S}$ . Звездочками обозначены моменты исследования внутренней микроструктуры – входной контроль и после нагрузки 63,97 кН.

емого углепластика показывает практически хрупкое разрушение. Аналогичное поведение слоистого углепластика  $[0^\circ/90^\circ]_{4S}$  при растяжении приводятся в других работах [6].

На рис. 3 приведена временная диаграмма энергии сигналов АЭ. Акустическая эмиссия регистрируется уже после деформации 0,25%, но ее энергия не превышает 1000 относительных единиц вплоть до деформации 0,7% (нагрузка 38 кН). Далее начинается устойчивый рост всплесков энергии АЭ от 1000 до 8000 отн. ед. при деформациях 0,8, 0,9 и 1,11%.

На рис. 4 представлены акустические изображения внутренней микроструктуры углепластика в исходном состоянии и после деформации  $\epsilon = 1,11\%$ .

На акустических изображениях отображается ориентация волокон в слоях в виде тонкой поло-

сатой структуры (рис. 4, слева), в том числе в виде пересекающихся полос, если отображаются два слоя с взаимно перпендикулярной укладкой (рис. 4, граница 2-го—3-го слоя).

После растяжения исследуемого слоистого углепластика были выявлены повреждения как в слоях с укладкой волокон  $[90^\circ]$  (перпендикулярных направлению приложенной нагрузки), так и с укладкой  $[0^\circ]$  (ориентированных вдоль действия нагрузки).

В слоях с  $[0^\circ]$  ориентацией волокон выявлены повреждения в виде потери адгезии по границам «волокно—матрица». Такие повреждения выявляются за счет отражения звука на границе с воздухом, что приводит к существенному росту амплитуды эхо-сигнала и максимальной яркости на изображениях. Поврежденные участки наблюдаются как прерывистые светлые линии, вытянутые вдоль укладки волокон.

В слоях с укладкой волокон  $[90^\circ]$  также наблюдаются изменения в микроструктуре. На рис. 4 (С-сканы, граница слоев  $[90^\circ/0^\circ]$ ) многочисленные нарушения структуры отображены в виде длинных темных полос с минимальным контрастом. Это тени, сформированные вертикальными трещинами в связующем между нитями волокон  $[90^\circ]$  слоя. Такие трещины не позволяют сформировать значительное отраженное/рассеянное излучение, как в случае с повреждениями в  $0^\circ$  слое, но препятствуют прохождению ультразвука, формируя за собой акустические тени, что позволяет выявлять такие повреждения. Сравнение акустических изображений разных участков образца свидетельствует об увеличении плотности трещин в  $[90^\circ]$  слоях при удалении от центральной части к захватам. Галтель перехода к захватной части является нерегулярной геометрической зоной, изменяющей распределение напряжений в материале, что могло послужить одной из причин, приведших к разрушению образца в такой зоне. Полное раз-

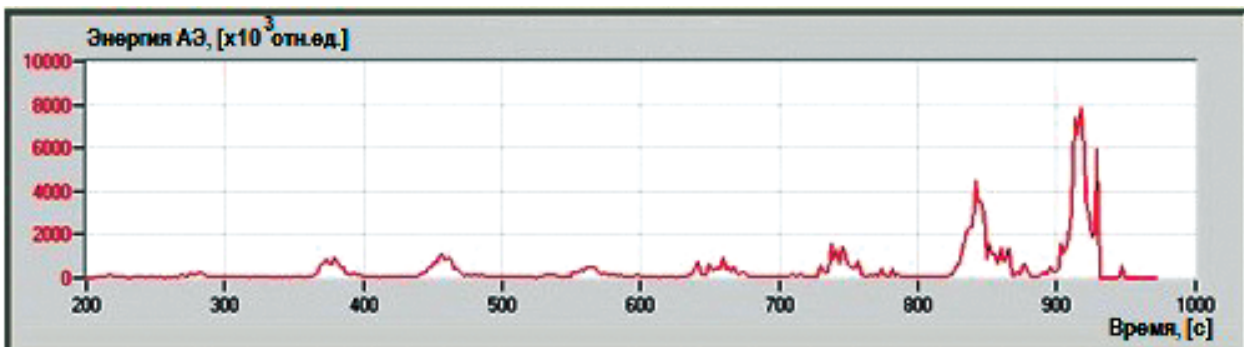


Рис. 3. Временная диаграмма энергии сигналов АЭ при квазистатическом ступенчатом растяжении слоистого углепластика  $[0^\circ/90^\circ]_{4S}$

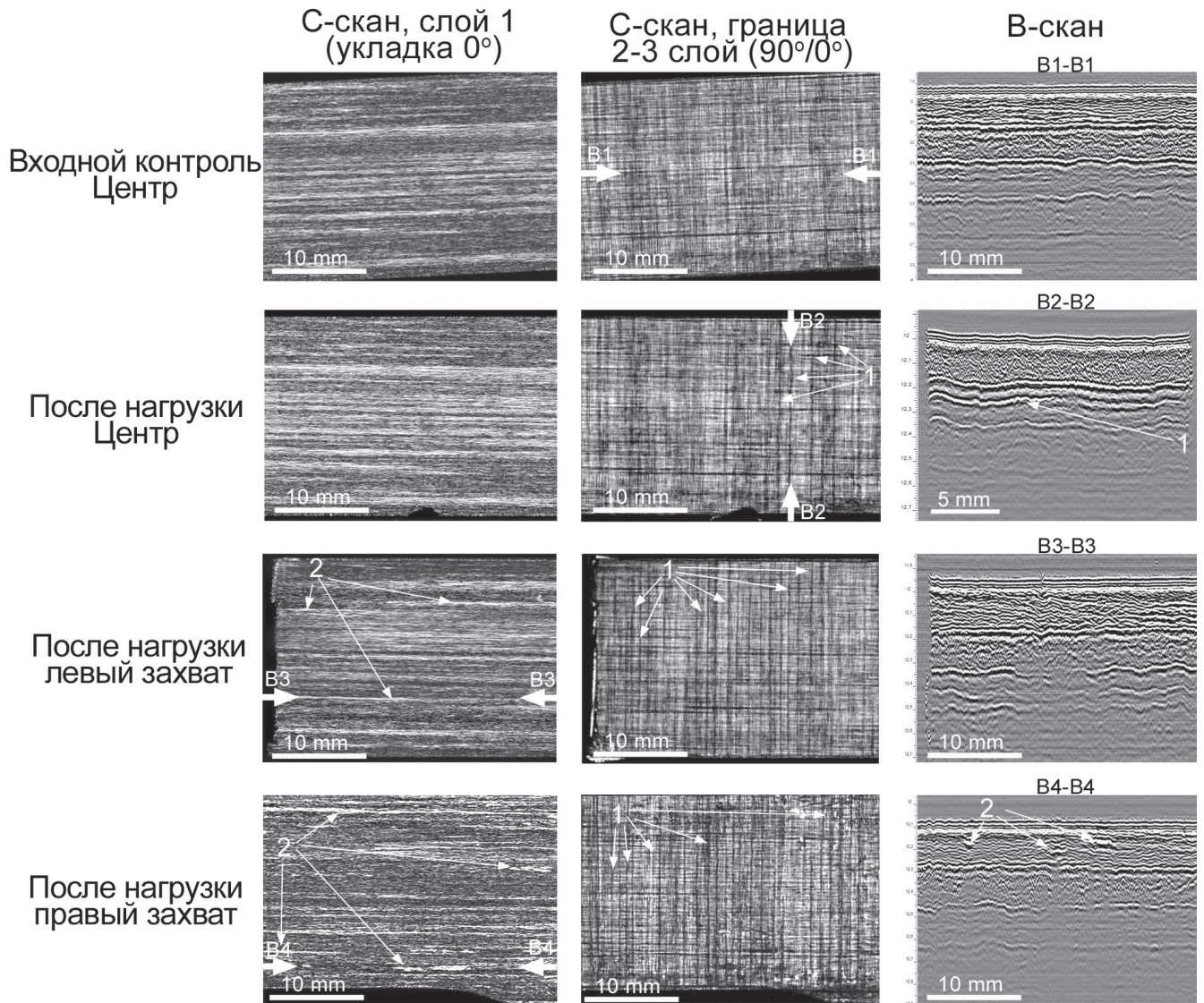


Рис. 4. Акустические изображения внутренней структуры верхних слоев образца  $[0^\circ/90^\circ]_{45}$  до и после растяжения ( $\varepsilon = 1.11\%$ ): 1 — трещины в матрице вдоль укладки волокон, перпендикулярной направлению нагрузки; 2 — нарушение адгезии по границе «волокно—матрица» вдоль направления нагрузки. Положения В-сканов отмечены стрелками В-В. Рабочая частота 100 МГц, поле сканирования  $33 \times 21$  мм ( $1100 \times 700$  DPI)

рушение образца произошло после образования и развития расслоений от свободной кромки образца. На рис. 5 приведены изображения образовавшихся расслоений.

Участки расслоений сформировались в срединной по толщине зоне образца на границах 7-го—8-го и 9-го—10-го слоя. На остальной части образца произошел разрыв  $[0^\circ]$  волокон и разрежение (расхождение) волокон в  $[90^\circ]$  слоях, что видно на акустических изображениях (рис. 5) и нашло подтверждение на оптических микрофотографиях области разрушения (рис. 6). Таким образом, разрушение исследованного слоистого углепластика  $[0^\circ/90^\circ]_{45}$  произошло в зоне с повышенной плотностью матричных трещин в  $[90^\circ]$

слоях и развивалось в виде расслоений от свободной кромки образца в срединных по толщине ламината слоях.

Результаты показывают, что при растяжении углепластика с укладкой  $[0^\circ/90^\circ]_{45}$  повреждение структуры начинается с микрорастрескивания связующего в  $[90^\circ]$  слоях (перпендикулярных действию нагрузки). На акустических изображениях такие дефекты в виде протяженных темных полос наблюдаются по всему объему образца — в центральной части и вблизи захватов. При дальнейшем нагружении происходят локальные ослабления адгезии по границам «волокно—матрица» в  $[0^\circ]$  слоях (вдоль направления нагрузки). При этом полимерная матрица локально теряет свою функ-

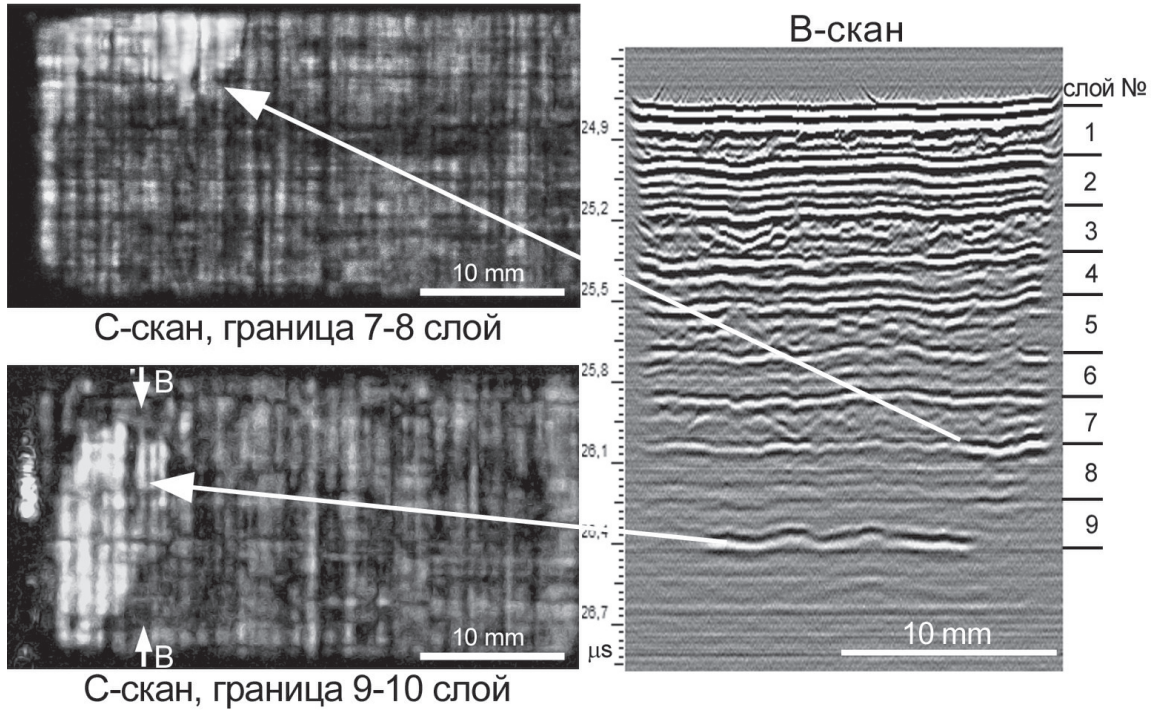
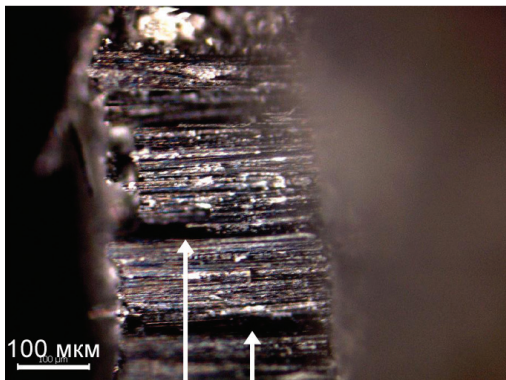
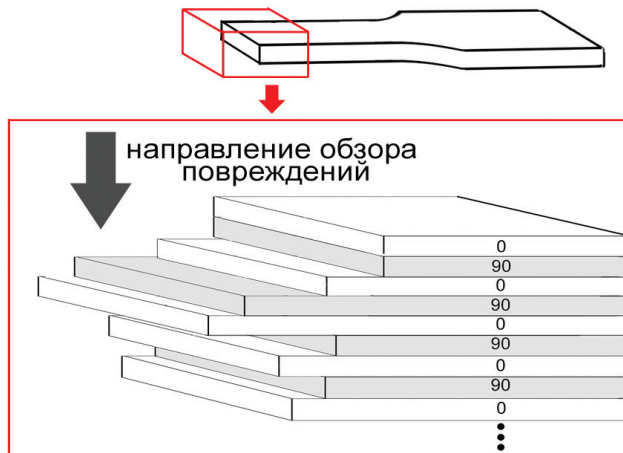
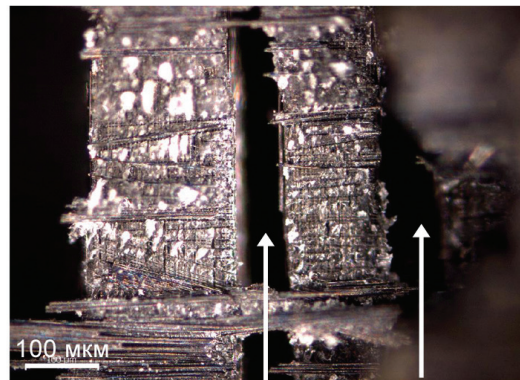


Рис. 5. Акустические изображения межслоевых повреждений после растяжения образца из углепластика  $[0^\circ/90^\circ]_{4S}$ . Номера слоев ламината обозначены цифрами. Расслоения образовались на границе: 7-го—8-го слоя на глубине 1,89 мм (С-скан); 9-го—10-го слоя на глубине 2,43 мм (С-скан). Положение поперечного сечения (В-скана) отмечено стрелками В-В на С-скане. Рабочая частота 50 МГц, поле сканирования  $45 \times 21$  мм ( $750 \times 350$  DPI).

Область излома углепластика



Трещины между волокнами  $0^\circ$



Трещины между волокнами  $90^\circ$

Рис. 6. Оптические микрофотографии области разрушения

цию связующего в композите. Происходит перераспределение нагрузки среди продольно ориентированных армирующих элементов, приводящее к разрушению перегруженных волокон, формированию протяженных расслоений и разрушению. В работе [3] расчетно-экспериментальным путем было показано, что при растяжении доминирующим разрушением ламината  $[(S)/90_n]_S$ , где слой (S) более жесткий по сравнению с  $[90_n]$ , является расслоение, начинающееся от свободной границы в зоне с высокой (критической) плотностью матричных трещин в  $[90^\circ]$  слоях. В исследуемом ламинате [S] слоем является  $[0^\circ]$  слой, жесткость которого выше  $[90^\circ]$  слоя.

#### 4.2. Испытание на трехточечный изгиб

Образец прошел два цикла квазистатического ступенчатого нагружения на изгиб:

нагружение №1:

(0–3,10 кН), прогиб  $\omega_{1\max} = 2,58$  мм,

$\varepsilon_{1\max} = 1,55\%$ ;

нагружение №2:

(0–3,50 кН), прогиб  $\omega_{2\max} = 3,0$  мм,

$\varepsilon_{2\max} = 1,75\%$ .

Расчет максимальных деформаций  $\varepsilon_{\max}$  в наиболее растянутой зоне образца вычислялся на основе балочной теории [21].

Испытания были завершены после разрушения поверхностных слоев образца в зоне действия нагружающего пуансона (область сжатия).

На рис. 7 и 8 представлены экспериментальные данные по нагружению и АЭ-мониторингу соответственно, а на рис. 9 — результаты исследования повреждений внутренней структуры образца в сравнении с исходным состоянием.

При трехточечном изгибе в композиционном материале возникают сложные деформации, включая локальные деформации растяжения, сжатия,

сдвига. Образование и рост повреждений при изгибе, как и при растяжении, происходит в последовательности: перераспределение напряжений, разрушение внутренних связей, высвобождение энергии, регистрируемое АЭ-аппаратурой.

Первое нагружение образца проходило практически при отсутствии АЭ. При прогибе 2,42 мм ( $F = 2,96$  кН) произошло падение нагрузки и был зафиксирован всплеск энергии АЭ до 2500 ед. (рис. 7). Дальнейшее увеличение прогиба до 2,58 мм ( $F = 3,10$  кН) сопровождалось единичным незначительным всплеском энергии. После выдержки при нагрузке 3,10 кН была произведена разгрузка образца и исследовалась внутренняя микроструктура. Были обнаружены (рис. 9) образование матричных трещин вдоль волокон  $[90^\circ]$  в растянутом объеме образца и разрушение волокон

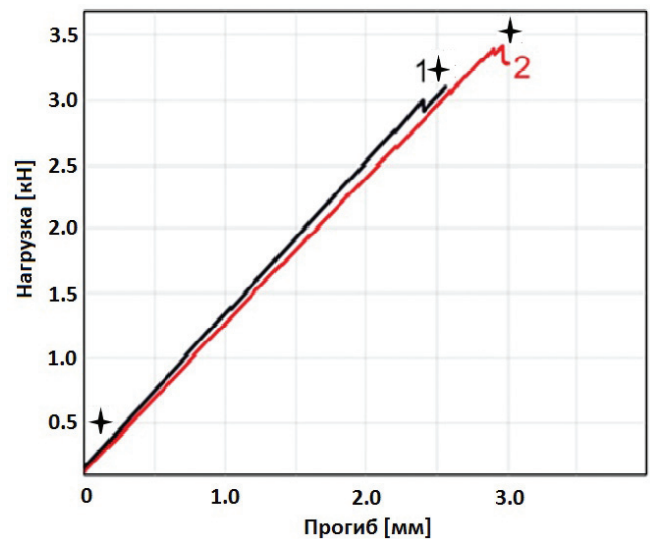


Рис. 7. Кривые «нагрузка—прогиб»: 1 — первое нагружение; 2 — второе нагружение. Звездочками обозначены моменты исследования внутренней микроструктуры образца

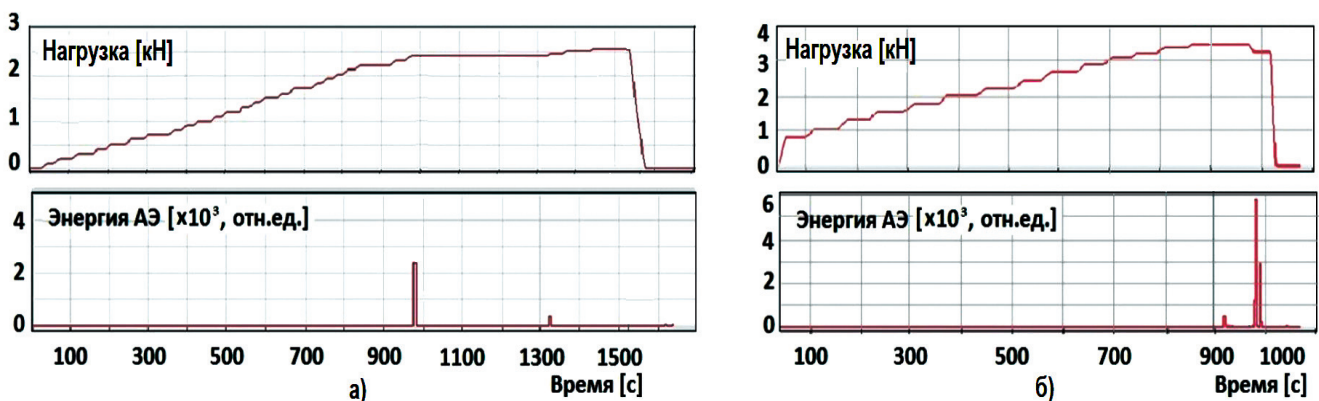


Рис. 8. Временные диаграммы прогиба образца и энергии АЭ: а — первое нагружение; б — второе нагружение



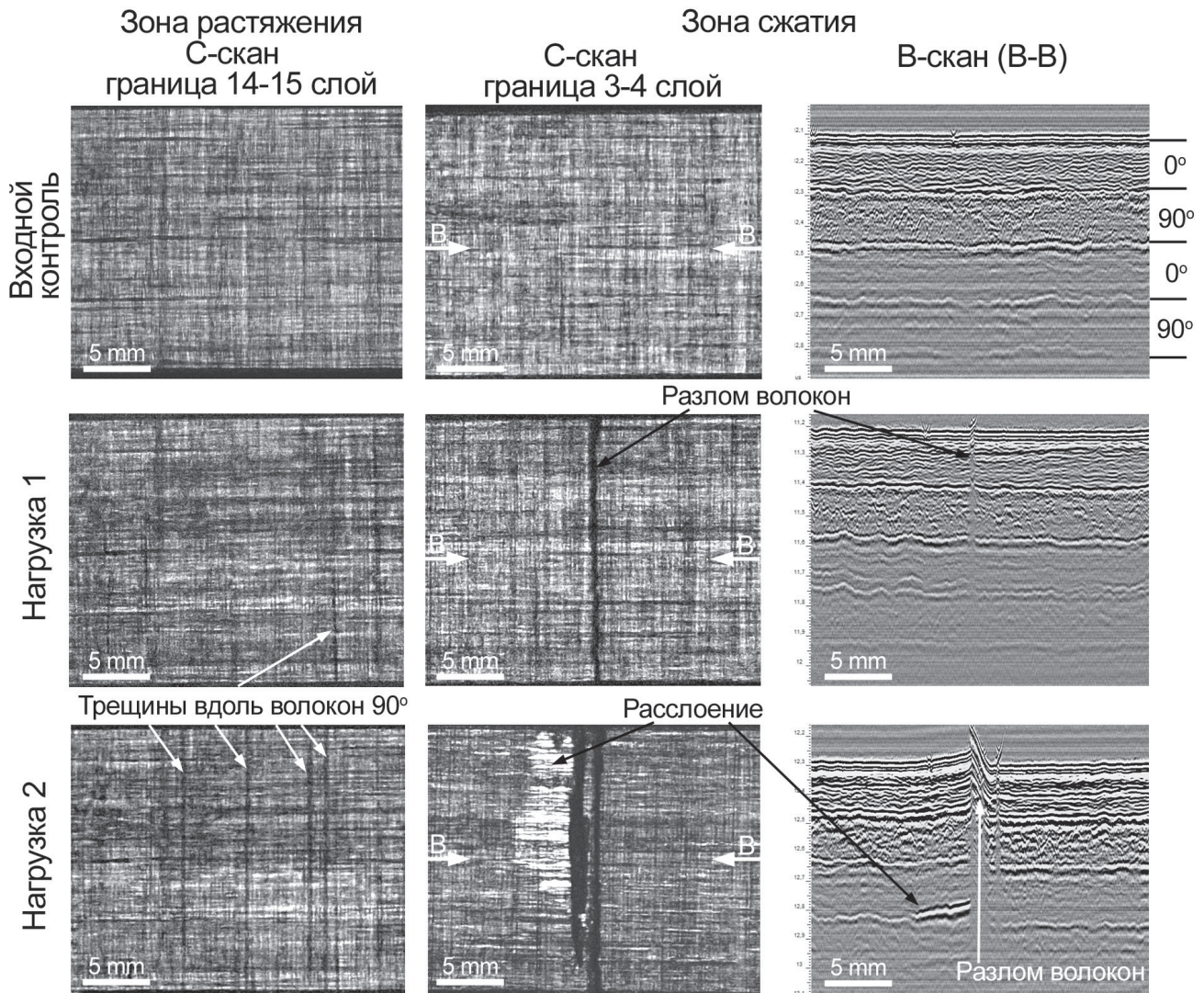


Рис. 9. Акустические изображения структуры образца в зоне растяжения и сжатия до и после нагружения № 1 и №2. Положения В-сканов в зоне сжатия обозначены стрелками В-В. Рабочая частота 100 МГц, поле сканирования 25×21 мм (830×700 DPI)

в верхних слоях под нагружающим пуансоном (область сжатия).

При втором нагружении образца при прогибе 3,5 мм был зафиксирован незначительный всплеск энергии АЭ. Далее произошло падение нагрузки, которое сопровождалось значительным всплеском энергии АЭ до 6000 ед. (рис. 8, б), а также треском — произошло разрушение поверхностных слоев в зоне приложения нагружающего пуансона (область сжатия).

Исследование внутренней структуры образца (рис. 9) после второго нагружения выявило образование расслоения по границе 3-го—4-го слоя, прилегающего к поперечному излому верхних слоев в области сжатия, а также увеличение плотности матричных трещин вдоль волокон  $[90^\circ]$  в области растяжения.

Особенностью повреждения ламинатов  $[0^\circ/90^\circ]_S$  при испытании на изгиб является относительно высокая скорость развития повреждений [1]. В растянутой зоне исследованного ламината происходило образование и накопление матричных трещин в  $[90^\circ]$  слоях, однако критическая плотность трещин не была достигнута, как в случае с одноосным растяжением (см. рис. 4 и 9). Разрушение началось с разлома волокон в поверхностных слоях в зоне максимального сжатия. Увеличение нагрузки привело к разрушению верхних сжатых слоев и образованию расслоения от края излома по границе с нижележащим слоем, и далее при достижении критического уровня нагрузки практически мгновенно произошло разрушение образца.

## Выводы

Процессы разрушения слоистого углепластика  $[0^\circ/90^\circ]_{4S}$  при одноосном растяжении и трехточечном изгибе отличаются длительностью накопления повреждений, приводящих к полному разрушению ламината. При растяжении активное образование и накопление повреждений происходило в диапазоне 55—100% предельной деформации. При изгибе процесс образования и накопления повреждений до разрушения был значительно короче — от 85 до 100% деформации в области растяжения.

Для случая растяжения и растянутой зоны при изгибе образца характерно образование и накопление вертикальных (поперечных) матричных трещин, ориентированных вдоль волокон в  $[90^\circ]$  слоях. Достижение критической плотности таких трещин приводит к образованию расслоений, начинающихся от свободной кромки ламината, и последующему разрушению образца.

При 3-точечном изгибе плотность поперечных матричных трещин в  $[90^\circ]$  слоях не достигла критического значения. Деформации сжатия определили характер разрушения ламината. В зоне действия пуансона произошел разлом волокон в поверхностных слоях, далее последовало разрушение слоев и образование расслоения от кромки нижнего разрушенного слоя. Образовавшиеся макроповреждения привели к полному разрушению образца.

Применение комбинации двух неразрушающих акустических методов (акустической эмиссии и акустической микроскопии) позволило выявить и охарактеризовать многоуровневые повреждения внутренней структуры слоистого углепластика при растяжении и изгибе. Установлены микроповреждения внутренней структуры, развитие и накопление которых приводит к образованию расслоений и последующему разрушению ламината. Такие микроповреждения являются предвестниками полного разрушения композиционного материала, а именно:

— образование зоны с высокой (критической) плотностью поперечных матричных трещин в  $[90^\circ]$  слоях;

— ослабление/повреждение адгезии по границе «волокно—матрица» в  $[0^\circ]$  слоях,

— наличие локальных разрушений волокон.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 18-2917039).*

## Библиографический список

1. *Mortell D.J., Tanner D.A., McCarthy C.T.* An experimental investigation into multi-scale damage progression in laminated composites in bending // *Composite structures*. 2016. Vol. 149, pp. 33-40. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.03.054
2. *Yang T., He M., Niu X., Du Y.* Experimental investigation of the three-point bending fatigue properties of carbon fiber composite laminates // *Advances in Material Science*. 2016. Vol. 1. No. 1, pp. 1-6. DOI: 10.18686/ams.v1i1.1
3. *Nairn J.A., Hu S.* The Initiation and Growth of Delamination Induced by Matrix Microcracks in Laminated Composites // *International Journal of Fracture*. 1992. No. 57, pp. 1-24. DOI: 10.1007/BF00013005
4. *Tabiei A., Zhang W.* Composite Laminate Delamination Simulation and Experiment: A Review of Recent Development // *Applied Mechanics Reviews*. 2018. Vol. 70. No. 3, p. 030801 (23 pages). AMR-17-1053. DOI: 10.1115/1.4040448
5. *Hosoi A., Yagi S., Nagata K., Kawada H.* Interaction between transverse cracks and edge delamination considering free-edge effects in composite laminates // 16th International Conference on Composite Materials ICCM-16 (8—13 July 2007; Kyoto, Japan). URL: [https://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM16proceedings/contents/pdf/WedI/WeIA1-04ge\\_hosoi222837p.pdf](https://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM16proceedings/contents/pdf/WedI/WeIA1-04ge_hosoi222837p.pdf)
6. *Reis P.N.B., Ferreira J.A.M., Antunes F.V., Richardson M.O.W.* Effect of Interlayer Delamination on Mechanical Behavior of Carbon/Epoxy Laminates // *Journal of Composite Materials*. 2009. Vol. 43. No. 22, pp. 2609-2621. DOI: 10.1177/0021998309344649
7. *Jollivet T., Walaszek H., Terrien N.* Damage and harmfulness of defects // *JEC Composites Magazine*. 2013. Vol. 50. No. 81, pp. 70-76.
8. *Groot P.J., Wijnen P.A.M., Janssen R.B.F.* Real-time Frequency Determination of Acoustic Emission for Different Fracture Mechanisms in Carbon/Epoxy Composites // *Composite Science and Technology*. 1995. Vol. 55. No. 4, pp. 405-412. DOI: 10.1016/0266-3538(95)00121-2
9. *Su-Ping Ai, Chang-Hang Xu, Guo-Ming Chen, Guo-Rui Li.* Acoustic Emission Monitoring of Degradation in Plain Weave CFRP Laminate // *AASRI International Conference on Industrial Electronics and Applications* (27—28 June 2015; London, UK). Vol. 2, pp. 63-67. DOI: 10.2991/iea-15.2015.17
10. *Силаев М.Ю., Еськова Е.А., Герус Д.С., Ремиев Е.Ю.* Применение метода акустической эмиссии при определении механических характеристик проволоки БрНХК-2,5-0,6-0,7 при производстве упругих элементов // *Вестник Московского авиационного института*. 2019. Т. 26. № 2. С. 182-192.
11. *Moreno M.C.S., Gutiérrez A.R., Vicente J.L.M.* Different response under tension and compression of unidirectional carbon fibre laminates in a three-point

- bending test // Composite Structures. 2016. Vol. 136, pp. 706-711. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.06.017
12. Garcea S.C., Wang Y., Withers P.J. X-ray computed tomography of polymer composites // Composites Science and Technology. 2018. Vol. 156, pp. 305-319. DOI: 10.1016/j.compscitech.2017.10.023
  13. ГОСТ 32656-2017 (ISO 527-4:1997, ISO 527-5:2009). Межгосударственный стандарт. Композиты полимерные. Методы испытаний. Испытания на растяжение. — М.: Стандартинформ, 2017. — 23 с.
  14. ГОСТ 25.601-80. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах. — М.: Стандартинформ, 2005. — 15 с.
  15. ГОСТ Р 56810-2015. Композиты полимерные. Метод испытания на изгиб плоских образцов. — М.: Стандартинформ, 2016. — 19 с.
  16. Summerscales J. (ed.) Non-Destructive Testing of Fibre-Reinforced Plastics Composites. — Springer Netherlands, 1990. Vol. 1. Chapter 2. Arrington M. «Acoustic emission». — 493 p.
  17. ГОСТ Р ИСО 12716-2009 Национальный стандарт Российской Федерации. Контроль неразрушающий. Акустическая эмиссия: Словарь. — М.: Стандартинформ, 2019. — 15 с.
  18. ASTM E 1316-02 Standard Terminology for Non-destructive Examinations. — ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002. DOI: 10.1520/E1316-02
  19. Briggs A., Kolosov O. Acoustic Microscopy. — Second Edition. — Oxford University Press, 2010. — 356 p.
  20. Закутайлов К.В., Левин В.М., Петронюк Ю.С. Ультразвуковые методы высокого разрешения: визуализация микроструктуры и диагностика упругих свойств современных материалов (обзор) // Заводская лаборатория. 2009. № 8(75). С. 28-34.
  21. Тимошенко С.П. Сопrotивление материалов. — В 2 т. — М.: Наука, 1965. — 368 с.

## APPLICATION OF ACOUSTIC METHODS FOR IDENTIFICATION AND CHARACTERIZATION OF FULL DESTRUCTION HARBINGERS OF CARBON FIBER-REINFORCED POLYMERS WHILE STRENGTH EXPERIMENTAL STUDY

**Ryzhova T.B.<sup>1\*</sup>, Petronyuk Yu.S.<sup>2\*\*</sup>, Morokov E.S.<sup>2\*\*\*</sup>,  
Gulevskii I.V.<sup>1\*\*\*\*</sup>, Levin V.M.<sup>2\*\*\*\*\*</sup>, Shanygin A.N.<sup>1\*\*\*\*\*</sup>**

<sup>1</sup> Central Aerohydrodynamic Institute named after N.E. Zhukovsky (TsAGI),  
1, Zhukovsky str., Zhukovsky, Moscow Region, 140180, Russia

<sup>2</sup> Institute of Biochemical Physics, Russian Academy of Sciences  
4, Kosygina str., Moscow, 119334, Russia

\* e-mail: tatyana.ryzhova@tsagi.ru, istctbr@mail.ru

\*\* e-mail: jps7@mail.ru

\*\*\* e-mail: es\_morokov@yahoo.com

\*\*\*\* e-mail: gulevsky@tsagi.ru

\*\*\*\*\* e-mail: levin1943@gmail.ru

\*\*\*\*\* e-mail: alexander.shanygin@tsagi.ru

### Abstract

A feature of polymer fiber-reinforced composites (PFRC) destruction is multi-focal point damages formation of microstructure under external impacts, their growth and coalescence, resulting in macro-damages formation and sudden destruction of a product. One of the factors impeding creation of the multi-level prognostic models of the PFRC destruction consists in limitation in non-destructive means, allowing study mechanisms of their internal structure damaging from micro- to macro-level.

A combination of two non-destructive acoustic methods was employed to study the multilevel damage

of a thick laminated carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) with the  $[0^\circ/90^\circ]_{45}$  stacking under loading on uniaxial stretching and three-point bending. The acoustic emission (AE) method allows continuous monitoring of the internal structure integrity of the tested material and loading parameters recording while the damage initiation and growth. Multilevel visualization of the material internal structure, acoustic microscopy (AM), allows identification and characterization of its damages from micro- to macro-level.

The samples being tested were cut out of a panel of the 4.32 mm thickness, fabricated by the prepreg

technology (M21/35%/268/T700GC, Hexcel) with the  $[0^\circ/90^\circ]_{4S}$  stacking and layer thickness of 270  $\mu\text{m}$  (16 layers). The step-type uniaxial stretching and three-point bending of the samples were performed.

It was revealed that the both loading types of the laminated CFRP  $[0^\circ/90^\circ]$  led to numerous damages forming in the material microstructure. While stretching, local weakening and adhesion damages along the “fiber-matrix” boundary occur in the layers with fibers stacking along the load action ( $[0^\circ]$  layers). The polymer matrix herewith locally loses its binding function in composite, which leads to load redistribution and destruction of overloaded fibers. Delaminations forming and total laminate destruction hereafter is plausible. In the layers with fiber stacking across the of the applied load direction ( $[90^\circ]$  layers), numerous vertical (transverse) cracks are being formed in the binder between the fibers. Under stretching, the sample demonstrated brittle fracture, which occurred in the area with high transverse crack density. Accumulation of transverse cracks was accompanied by delamination forming off the free edge of the sample and subsequent complete destruction.

Complex deformations, including local stretching, compressive and shearing strains, occur in the composite at bending loading. Formation and accumulation of the transverse matrix cracks in the  $[90^\circ]$  layers is prevailing in the area of the sample stretching. The fibers destruction under the loading punch occurred in the compression area. Further, destruction of the three upper layers, and formation of delamination between the third and the fourth layers took place.

The fracture process of the laminated PFRC with  $[0^\circ/90^\circ]_{4S}$  stacking under uniaxial stretching and three-point bending differ in the duration of damages accumulation, resulting in complete destruction of the composite. While stretching, active damages forming and accumulating occurred within the range of 55—100% of ultimate deformation. At bending, active damages forming and accumulating process was three times shorter, namely from 85 to 100% of strain of destruction in the stretching area.

Application of the two non-destructive acoustic methods combination (acoustic emission and acoustic microscopy) allowed identifying and characterizing multilevel damages of the internal structure of the laminated PFRC under uniaxial stretching and three-point bending. Micro-damages of the internal structure, which development and accumulation result in delamination formation with subsequent laminate destruction, were identified. These micro-damages are

the harbingers of the full destruction of the material, namely:

- zones with high (critical) density of transverse matrix cracks in  $[90^\circ]$  layers,
- the adhesion weakening/damaging along the “fiber-matrix” interfaces in  $[0^\circ]$  layers,
- local fibers fractures.

**Keywords:** laminated carbon fiber-reinforced plastic, stretching, three-point bending, total failure harbingers, damages accumulation, acoustic methods.

## References

1. Mortell D.J., Tanner D.A., McCarthy C.T. An experimental investigation into multi-scale damage progression in laminated composites in bending. *Composite structures*, 2016, vol. 149, pp. 33-40. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.03.054
2. Yang T., He M., Niu X., Du Y. Experimental investigation of the three-point bending fatigue properties of carbon fiber composite laminates. *Advances in Material Science*, 2016, vol. 1, no. 1, pp. 1-6. DOI: 10.18686/ams.v1i1.1
3. Nairn J.A., Hu S. The Initiation and Growth of Delamination Induced by Matrix Microcracks in Laminated Composites. *International Journal of Fracture*, 1992, no. 57, pp. 1-24. DOI: 10.1007/BF00013005
4. Tabiei A., Zhang W. Composite Laminate Delamination Simulation and Experiment: A Review of Recent Development. *Applied Mechanics Reviews*, 2018, vol. 70, no. 3, p. 030801 (23 pages). AMR-17-1053. DOI: 10.1115/1.4040448
5. Hosoi A., Yagi S., Nagata K., Kawada H. Interaction between transverse cracks and edge delamination considering free-edge effects in composite laminates. *16<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials ICCM-16 (8-13 July 2007; Kyoto, Japan)*.
6. Reis P.N.B., Ferreira J.A.M., Antunes F.V., Richardson M.O.W. Effect of Interlayer Delamination on Mechanical Behavior of Carbon/Epoxy Laminates. *Journal of Composite Materials*, 2009, vol. 43, no. 22, pp. 2609-2621. DOI: 10.1177/0021998309344649
7. Jollivet T., Walaszek H., Terrien N. Damage and harmfulness of defects. *JEC Composites Magazine*, 2013, vol. 50, no. 81, pp. 70-76.
8. Groot P.J., Wijnen P.A.M., Janssen R.B.F. Real-time Frequency Determination of Acoustic Emission for Different Fracture Mechanisms in Carbon/Epoxy Composites. *Composite Science and Technology*, 1995, vol. 55, no. 4, pp. 405-412. DOI: 10.1016/0266-3538(95)00121-2
9. Su-Ping Ai, Chang-Hang Xu, Guo-Ming Chen, Guo-Rui Li Acoustic Emission Monitoring of Degradation in Plain Weave CFRP Laminate. *AASRI International Conference on Industrial Electronics and Applications*

- (27-28 June 2015; London, UK), vol. 2, pp. 63-67. DOI: 10.2991/iea-15.2015.17
10. Silaev M.Y., Es'kova E.A., Gerus D.S., Remshev E.Y. Acoustic emission method application while determining mechanical characteristics of the brnicrsi-2,5-0,6-0,7 wire for elastic elements production. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 2, pp. 182-192.
  11. Moreno M.C.S., Gutiérrez A.R., Vicente J.L.M. Different response under tension and compression of unidirectional carbon fibre laminates in a three-point bending test. *Composite Structures*, 2016, vol. 136, pp. 706-711. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.06.017
  12. Garcea S.C., Wang Y., Withers P.J. X-ray computed tomography of polymer composites. *Composites Science and Technology*, 2018, vol. 156, pp. 305-319. DOI: 10.1016/j.compscitech.2017.10.023
  13. *GOST 32656-2017 (ISO 527-4:1997, ISO 527-5:2009) Mezhhgosudarstvennyi standart. Kompozity polimernye. Metody ispytaniy. Ispytaniya na rastyazhenie* (Polymer composites. Test methods. Tensile test methods. Interstate Standard 32656-2017 <ISO 527-4:1997, ISO 527-5:2009>), Moscow, Standartinform, 2017, 23 p.
  14. *Raschety i ispytaniya na prochnost'. Metody mekhanicheskikh ispytaniy kompozitsionnykh materialov s polimernoi matritsei (kompozitov). Metod ispytaniya ploskikh obraztsov na rastyazhenie pri normal'noi, povyshennoi i ponizhennoi temperaturakh. GOST 25.601-80* (Design calculation and strength testings. Methods of Mechanical testing of Polymeric Composite Materials Test for Tensile Properties on Plane Specimens at Normal, Elevated and Low Temperature. State Standard 25.601-80), Moscow, Standartinform, 2005, 15 p.
  15. *Kompozity polimernye. Metod ispytaniya na izgib ploskikh obraztsov. GOST R 56810-2015* (Polymer composites. Test method for flexural flat samples. State Standard R 56810-2015), Moscow, Standartinform, 2016, 19 p.
  16. Summerscales J. (ed.) *Non-Destructive Testing of Fibre-Reinforced Plastics Composites*. Springer Netherlands, 1990. Vol. 1. Chapter 2. Arrington M. "Acoustic emission", 493 p.
  17. *Natsional'nyi standart Rossiiskoi Federatsii. Kontrol' nerazrushayushchii. Akusticheskaya emissiya. Slovar'. GOST R ISO 12716-2009* (Non-destructive testing. Acoustic emission inspection. Vocabulary. National Standard of the Russian Federation R ISO 12716-2009), Moscow, Standartinform, 2019, 15 p.
  18. *ASTM E 1316-02 Standard Terminology for Nondestructive Examinations*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002. DOI: 10.1520/E1316-02
  19. Briggs A., Kolosov O. *Acoustic Microscopy*. Second Edition. Oxford University Press, 2010, 356 p.
  20. Zakutailov K.V., Levin V.M., Petronyuk Yu.S. *Zavodskaya laboratoriya*, 2009, no. 8(75), pp. 28-34.
  21. Timoshenko S.P. *Soprotivlenie materialov. V 2-kh t.* (Resistance of materials. In 2 vols), Moscow, Nauka, 1965, 368 p.