

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-8-58-65>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ СЛОИСТЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ НА ОБРАЗЦАХ БЕЗ ИНИЦИАТОРА ТРЕЩИНЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ

© Андрей Вячеславович Панков¹, Владимир Леонидович Токарь¹, Юлия Степановна Петронюк^{2*}, Вадим Моисеевич Левин², Егор Степанович Мороков², Татьяна Борисовна Рыжова¹, Игорь Владимирович Гулевский¹

¹ Центральный Аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского, Россия, 140180, Московская обл., г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1.

² Институт биохимической физики им. Н. М. Эмануэля Российской академии наук, Россия, 119334, Москва, ул. Косыгина, д. 4; *e-mail: jps7@mail.ru

Статья поступила 20 ноября 2019 г. Поступила после доработки 10 февраля 2020 г. Принята к публикации 1 апреля 2020 г.

Одним из параметров трещиностойкости углепластиков является вязкость разрушения, которая представляет собой изменение энергии упругой деформации элемента конструкции при увеличении площади трещины на единицу в момент страгивания. В процессе исследования вязкости разрушения определяется положение фронта трещины — исходной и полученной в результате ее роста. Существующие в настоящее время стандарты испытаний (СТО ЦАГИ, ASTM D7905) определяют вязкость по моде сдвига G_{IIc} на образцах с инициатором трещины. Такой способ не отражает реальные условия возникновения трещин в конструкциях из ПКМ и может приводить к снижению точности при определении нагрузки страгивания трещины. В ЦАГИ разработана методика определения вязкости разрушения ПКМ при сдвиге G_{IIc} на образцах без стандартного инициатора расслоений. Цель работы — проведение исследований для отработки данной методики. Значения G_{IIc} определяли для трещины, образованной сдвигом в условиях трехточечного изгиба после расклинивания. Для определения положения и формы фронта трещины, а также оценки динамики ее распространения при последующих нагрузках вместо стандартного визуального наблюдения ее границ с торцевой поверхности образцов использовали ультразвуковые методы — ультразвуковую дефектоскопию (УЗК) и акустическую микроскопию. Установлено, что акустическая микроскопия на частоте 50 МГц позволяет определять положение фронта трещины в образцах из углепластика на глубине 3,0 – 3,5 мм с высоким разрешением, в данном случае — 100 мкм. Отмечены особенности распространения трещины в процессе роста в условиях сдвига. Результаты исследований показали, что высокая точность акустической микроскопии по сравнению с традиционной ультразвуковой диагностикой востребована при определении формы трещины, для анализа динамики ее распространения и выявления механизмов распространения межслоевых трещин в композиционной среде.

Ключевые слова: композиты; механические свойства; трещиностойкость; углепластики; ультразвуковые методы; акустическая микроскопия.

DETERMINATION OF FRACTURE TOUGHNESS FOR CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS FREE OF THE CRACK INITIATOR USING THE ACOUSTIC MICROSCOPY

© Andrey V. Pankov¹, Vladimir L. Tokar¹, Yulia S. Petronyuk^{2*}, Vadim M. Levin², Egor S. Morokov², Tatiana B. Ryzhova¹, Igor V. Gulevsky¹

¹ Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI), 1, Zhukovskogo ul., Zhukovsky, Moscow obl., 140180, Russia.

² Institute of Biochemical Physics, Russian Academy of Science, 4, Kosygina ul., Moscow, 119334, Russia; *e-mail: jps7@mail.ru

Received November 20, 2019. Revised February 10, 2020. Accepted April 01, 2020.

The fracture toughness which reflects change in the elastic deformation energy of the structural element with an increase in the crack area per unit at the onset of straining is one of the crack resistance param-

ters of carbon fiber plastics (CFRPs). When studying the fracture toughness, the position of the crack front is determined: both the initial one and that obtained as a result of crack growth. Currently existing test standards (STO TsAGI, ASTM D7905) determine the viscosity by the shear mode G_{IIc} using the samples with a crack initiator. However, the method does not reflect the real conditions of crack initiation in CFRPs structures and can lead to a decrease in the accuracy of determining the load of crack initiation. A new technique of the fracture viscosity determination free of the standard delamination initiator has been developed in TsAGI. We present the results of developing the proposed methodology. The G_{IIc} values were determined for a shear crack under three-point bending conditions after wedging. To determine the position and shape of the crack front, as well as to assess the dynamics of its propagation under subsequent loads, we used ultrasonic methods — ultrasonic flaw detection (ultrasonic NDT) and acoustic microscopy instead of the standard visual observation of the crack boundaries from the end surface of the samples. It is shown that acoustic microscopy at a frequency of 50 MHz provides determination of the crack front position in CFRP samples at a depth of 3.0 – 3.5 mm with a high resolution about 100 μm . The features of the crack growth under shear conditions are discussed. The results of the study show that high accuracy of acoustic microscopy in comparison with traditional ultrasonic NDT diagnostics is strongly sought for determining the shape of the cracks, as well as for analyzing the dynamics of crack growth and revealing the mechanisms of interlayer crack propagation in a composite material.

Keywords: composites; mechanical properties; fracture toughness; carbon fiber plastics; ultrasonic methods; acoustic microscopy.

Введение

Слоистые полимерные углепластики широко применяются в самолетостроении. Они обладают высокой прочностью при относительно невысоком весе за счет высокопрочных волокон наполнителя, уложенного слоями в разных направлениях и скрепленного матрицей — отвержденным полимерным связующим. Наряду с высокой прочностью при нагружении вдоль волокон материал из-за гетерогенности структуры имеет низкую прочность при нагружении поперек волокон и межслоевом сдвиге. Действие сдвигающих нагрузок может приводить к образованию межслоевых трещин (расслоений). Расслоение — доминирующее повреждение ламинатов, приводящее к разрушению конструкции при достижении дефектом критических размеров [1 – 3]. Особая опасность заключается в том, что трещина может оставаться необнаруженной вплоть до разрушения конструкции.

Одними из основных способов определения прочностных свойств слоистых углепластиков с расслоениями являются расчетно-экспериментальные методы, основанные на использовании характеристик трещиностойкости материала, получаемых экспериментально на элементарных лабораторных образцах [4 – 9]. В работах [10 – 14] приведены расчетные оценки прочности поврежденных конструкций из ПКМ, которые дают представление о необходимости получения и использования этих характеристик.

Важным параметром трещиностойкости является вязкость разрушения по моде сдвига G_{IIc} (мода II), которая представляет собой изменение энергии упругой деформации элемента конструкции при увеличении площади трещины на единицу в момент страгивания, обусловленного сдвигом материала у вершины трещины. Таким

образом, основная задача в процессе исследования вязкости разрушения — определение положения фронта трещины — исходной и полученной в результате ее роста.

По существующим в настоящее время стандартам испытаний (СТО ЦАГИ, гармонизированного с ASTM D7905 [15, 16]) G_{IIc} определяется на элементарных образцах с межслоевой трещиной на одном из торцов. В качестве инициатора трещины используется полимерная пленка, импрегнируемая в образец в процессе его изготовления. Такой способ не отражает реальные условия возникновения трещин в конструкциях из ПКМ и может приводить к снижению точности при определении нагрузки страгивания трещины. Кроме того, часто необходимо определить G_{IIc} для натуральных элементов конструкции из ПКМ при отсутствии в исходном состоянии инициатора расслоения. Для таких случаев во ФГУП ЦАГИ разрабатывается методика определения вязкости разрушения ПКМ при сдвиге G_{IIc} на образцах без стандартного инициатора расслоений.

В данной работе предложен новый способ формирования исходной трещины, который позволит уменьшить погрешность, связанную с необходимостью продвижения искусственного дефекта для формирования трещины как таковой. Исходную трещину в образце предложено формировать путем расклинивания стальным клином с торцевой поверхности. Для наиболее точного определения положения и формы фронта трещины, а также визуализации динамики ее распространения при последующих нагрузках использовали ультразвуковые методы высокого разрешения (акустическую микроскопию).

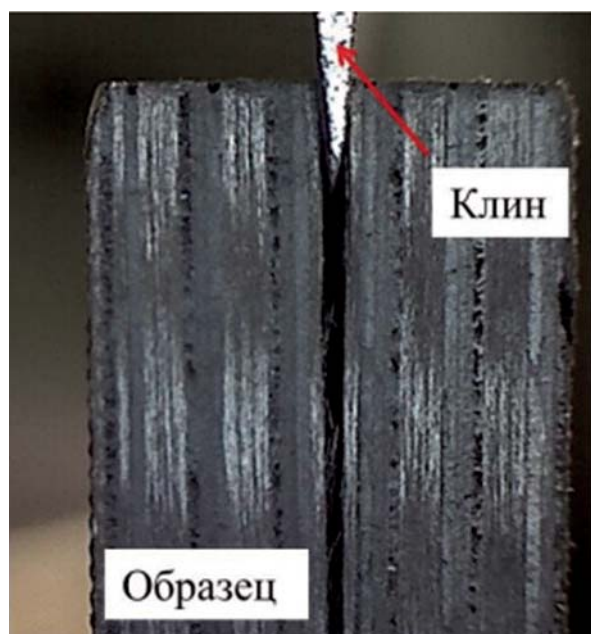


Рис. 1. Вид трещины в образце, полученной методом расклинивания

Fig. 1. Crack formation in a CFRP sample obtained by wedging

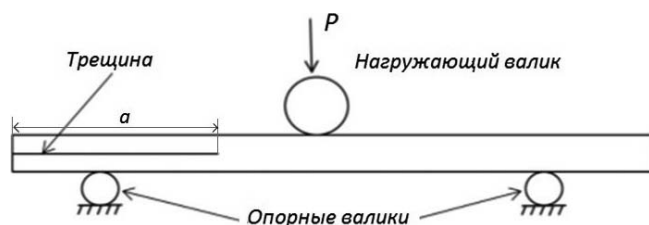


Рис. 2. Схема испытаний на трещиностойкость по моде II

Fig. 2. Tests diagram for crack resistance according to the shear mode II

Материалы и методы исследования

Экспериментальные исследования проводили на девяти образцах из ПКМ на основе углеродных волокон и эпоксидной матрицы. Образцы вырезали из панели, изготовленной из 34 слоев перекрестно-армированного углепластика, они представляли собой параллелепипеды длиной 170 мм, шириной 20 мм и толщиной 6,3 мм. Трещину формировали механическим воздействием (расклиниванием) с торца образца между 16-м и 17-м слоями, укладка армирующего наполнителя в которых параллельна боковым сторонам образца. Образцы отбирали случайным образом из 30 аналогичных, вырезанных из единой панели. В соответствии с разрабатываемой методикой в образце с помощью тонкого клина создавали межслоевую трещину (рис. 1).

Исследования проводили следующим образом. На этапе 1 на образцы из слоистого углепла-

стика методом расклинивания наносили межслоевые трещины. Положение фронта трещины a и значение G_{IIc} определяли путем сравнительного анализа результатов, полученных стандартным ультразвуковым методом неразрушающего контроля (УЗК) и методом акустической микроскопии (АМ).

На этапе 2 в целях продвижения трещин, образованных расклиниванием, образцы испытывали на трехточечный изгиб (по описанной в СТО ЦАГИ методике) для определения G_{IIc} (рис. 2). (Трещина, выращенная при испытании на изгиб, в дальнейшем называется трещиной, образованной «сдвигом».) Далее на каждом образце выполняли цикл работ по определению положения фронта трещины и оценке G_{IIc} , аналогичный этапу 1.

В стандарте [16] метод определения удельной работы расслоения в условиях сдвига G_{IIc} включает в себя неразрушающую процедуру нахождения фронта трещины в образце. Эта процедура должна, с одной стороны, быть достаточно простой в применении, а с другой — обладать необходимой точностью.

Наиболее простым является визуальный метод, однако его применение может приводить к значительным погрешностям в определении длины трещины. Погрешность обусловлена малым раскрытием трещины у кончика и низкой яркостью цветового контраста на поверхности ПКМ. Кроме того, положения фронта в краевой и внутренней зонах могут отличаться. В связи с этим для исследований применяли ультразвуковой контроль, который воспроизводит положение фронта с точностью, зависящей от длины волны зондирующего звука. Для обнаружения трещин в ПКМ широко используют ультразвуковой метод (УЗК), позволяющий определять положение фронта как на образцах, так и на натурных конструкциях в широком диапазоне толщин исследуемых элементов. Однако вследствие ограниченной разрешающей способности при частоте акустического сигнала 4 МГц метод не позволяет определить форму фронта трещины. Поэтому в данной работе для определения формы фронта трещины применяли акустическую микроскопию — метод ультразвукового контроля с высокой разрешающей способностью.

Ручной ультразвуковой контроль (УЗК). Преимущество ручного ультразвукового контроля — приемлемая производительность, контролируемая толщина слоистых углепластиков — до 15 мм. К недостаткам можно отнести низкую фронтальную разрешающую способность из-за величины апертуры преобразователей, соизмеримой с шириной образцов, что ограничивает возможность выявления неровностей фронта трещин. В данной работе использовали ультра-

звуковой дефектоскоп Sitiescan D20 с раздельно-совмещенным преобразователем с рабочей частотой 4 МГц и диаметром рабочей части 10 мм. Разрешение УЗК метода в эксперименте соответствовало 2 мм.

Предварительную настройку чувствительности прибора проводили на бездефектной части образца по донному сигналу. Из-за относительно большого размера апертуры преобразователя при его перемещении вдоль продольной оси образца наблюдалась переходная зона уменьшения амплитуды эхо-сигнала от трещины. За точку фронта трещины принимали положение центра преобразователя, соответствующее уменьшению амплитуды эхо-сигнала в два раза (6 дБ) по сравнению с амплитудой, измеренной на удалении более 10 мм от фронта в сторону начальной трещины.

Акустическая микроскопия (АМ). Ультразвуковой метод высокого разрешения с автоматизированным сканированием объема материала обеспечивает максимально возможную фронтальную разрешающую способность. В данном исследовании он был применен как экспертный метод. Преимуществом АМ является возможность визуализации внутренней структуры контролируемого материала как в плоскостях на разной глубине (С-сканы), так и в поперечном сечении (В-сканы). При сканировании образца в плоскости X, Y ультразвуковой эхо-сигнал $A(t)$ сохраняется в каждой точке, в результате чего формируется трехмерная акустическая картина исследуемой структуры, анализировать которую эффективнее всего в проекциях на требуемой глубине (С-скан). Из-за особенностей структуры слоистых углепластиков и высокого затухания ультразвука в композитной среде акустическая микроскопия имеет ограничения по контролируемой толщине до 5 мм.

Образцы исследовали на сканирующем импульсном акустическом микроскопе СИАМ-2, разработанном в ИБХФ РАН [18–20], с помощью длиннофокусного акустического объектива с номинальной рабочей частотой 50 МГц и апертурным углом линзы, равным 8° . Такие характеристики аппаратуры обеспечивали необходимую глубину проникновения зондирующего импульса в образцы из ПКМ и высокое латеральное разрешение изображений. Для обеспечения контакта акустического датчика с образцом использовали водно-гелевую иммерсию. Латеральное разрешение акустических изображений обусловлено диаметром фокальной перетяжки в материале и шагом сканирования, которые в данном случае составили 60 и 100 мкм соответственно. Положение и форма фронта трещины отображались на С-сканах в диапазоне от 3 до 3,5 мм по глубине.

Результаты исследования

На рис. 3 представлены изображения (С-сканы) трещин в трех образцах, полученных на этапе 1 (расклиниванием) и этапе 2 (сдвигом). Линия фронта трещин, полученных на этапе 1, у большинства образцов была гладкой, без изломов (см. рис. 3, а). На этапе 2 у трех образцов линия фронта трещин осталась ровной, а у шести образцов приняла зубчатую форму (см. рис. 3, б) с количеством зубцов от трех до пяти. Появление зубцов, возможно, связано с наличием заполненных отвержденным связующим промежутков между армирующими лентами в слоях ПКМ. На С-скане (см. рис. 3, б) эти промежутки выглядят как темные полосы, протянувшиеся параллельно боковым сторонам образца.

На С-сканах обозначены границы образцов и фронты трещин, на которых отмечены пять точек для оценки положения эффективного фронта трещины в соответствии с рекомендациями стандарта испытаний. Эффективным фронтом трещины называется линия, перпендикулярная боковым сторонам образца, при этом площади трещин, ограниченных реальным и эффективным фронтами, равны между собой. Пять точек, по которым определяли положение фронта, располагались на одинаковом расстоянии друг от друга. Положение фронта трещины измеряли электронным инструментом программной оболочки акустического микроскопа с точностью $\pm 0,05$ мм.

Результаты определения положения эффективного фронта трещин для девяти образцов на двух этапах испытаний методами УЗК и АМ приведены в таблице. Разность средних по девяти образцам значений положения эффективного фронта трещин, определенных УЗК и АМ, на этапе 1 составила 1,6 мм, а на этапе 2 — 2,5 мм, что соответствует 5 и 8 % от общей средней длины трещины, равной 35,4 мм, при страгивании (СТО ЦАГИ). На этапе 1 среднее значение положения фронта трещины, определенное УЗК, было больше, чем установленное методом АМ, а на этапе 2 — наоборот.

Возможно, отличие возникло из-за разного уровня погрешности измерения двух методов: во втором случае чувствительность УЗК датчика не позволяла регистрировать сигнал от изрезанных краев фронта трещины, поэтому линию фронта определяли по минимальным положениям этой кривой с учетом систематической погрешности метода, которая в данном случае оказалась меньше изломанности линии фронта. В случае более гладкого фронта измерения зависят только от систематической ошибки, которая для УЗК больше. Возможной причиной отличия может быть разница в способе образования трещины — расклинивание или сдвиг.

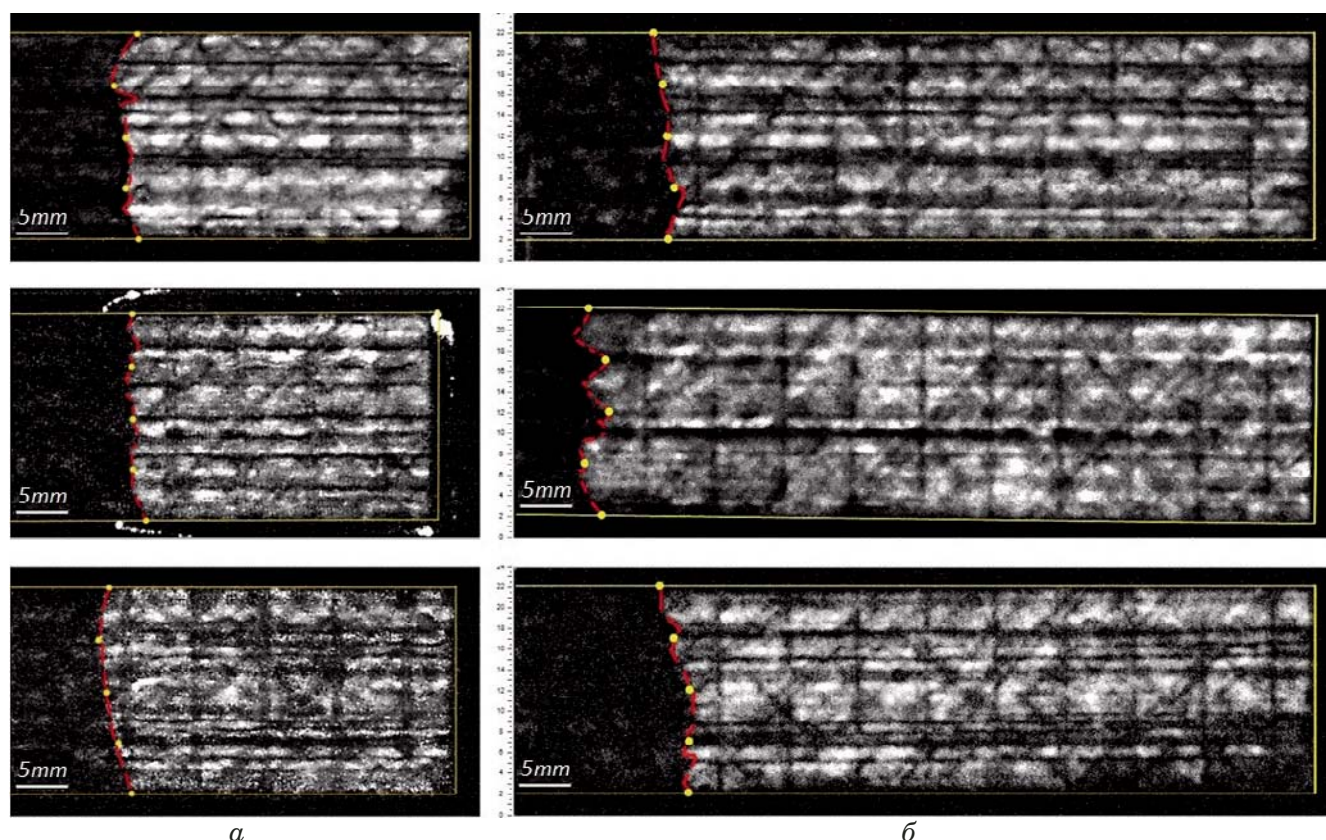


Рис. 3. Акустические изображения трещины (C-сканы) между 16-м и 17-м слоями в образцах углепластикового ламината на этапе 1 (а) и этапе 2 (б)

Fig. 3. Acoustic images (C-scans) of the cracks at the interface between 16 and 17 layers in CFRP samples: *a* — step 1, *b* — step 2

Вязкость разрушения определяли как

$$G_{IIc} = \frac{3mP_0^2 a^2}{2b},$$

где a — позиция фронта трещины относительно опор испытательной машины; b — ширина образца; P_0 — нагрузка при страгивании трещины, определяемая в области перехода к нелинейному участку кривой нагружения; $m = 8,77 \cdot 10^{-9} \text{ 1/(Н} \cdot \text{мм}^2)$ — коэффициент, который находили экспериментальным путем через зависимость податливости балки с расщеплением от положения фронта $C(a) = C_0 + ma^3$ (C_0 — податливость нерасщепленной пластинки балки) [8, 16].

По измеренным положениям фронта трещин определяли вязкость разрушения G_{IIc} для каждого из девяти образцов и среднее по всем образцам значение на каждом этапе — G_{IIc} . В таблице приведены относительные значения G_{IIc}/G_{IIc} на каждом этапе. Разница между значениями G_{IIc} , полученными методами УЗК и АМ, на этапе 1 составила 1,2 %, на этапе 2 — 0,6 %.

По результатам анализа не выявлено влияния формы фронта трещины на величину вязкости G_{IIc} . Среднее по всем образцам значение

G_{IIc} для образованной расклиниванием трещины на этапе 1 оказалось на 6 % меньше, чем G_{IIc} для трещины, образованной сдвигом на этапе 2 при соответствующих коэффициентах вариации значений G_{IIc} , равных 10 и 11 %.

При определении положения эффективного фронта трещины исследовали влияние количества точек на фронте на определяемые значения G_{IIc} — вместо пяти точек, рекомендованных по стандарту испытаний, были выбраны девять эквидистантных точек. Для исследуемых образцов максимальное различие в положении эффективного фронта, рассчитанное по девяти и пяти точкам, составило 0,7 мм. Соответствующее различие G_{IIc} составило 0,14 %. Результаты показали, что увеличение количества точек для определения G_{IIc} сверх рекомендованного значения нецелесообразно.

Методами акустической микроскопии выявлено, что в процессе роста основного дефекта в объемной структуре ПКМ могут возникать дополнительные отслоения в соседних межслоевых зонах (рис. 4). При этом значение G_{IIc} для данного образца практически не отличалось от величин G_{IIc} для других образцов.

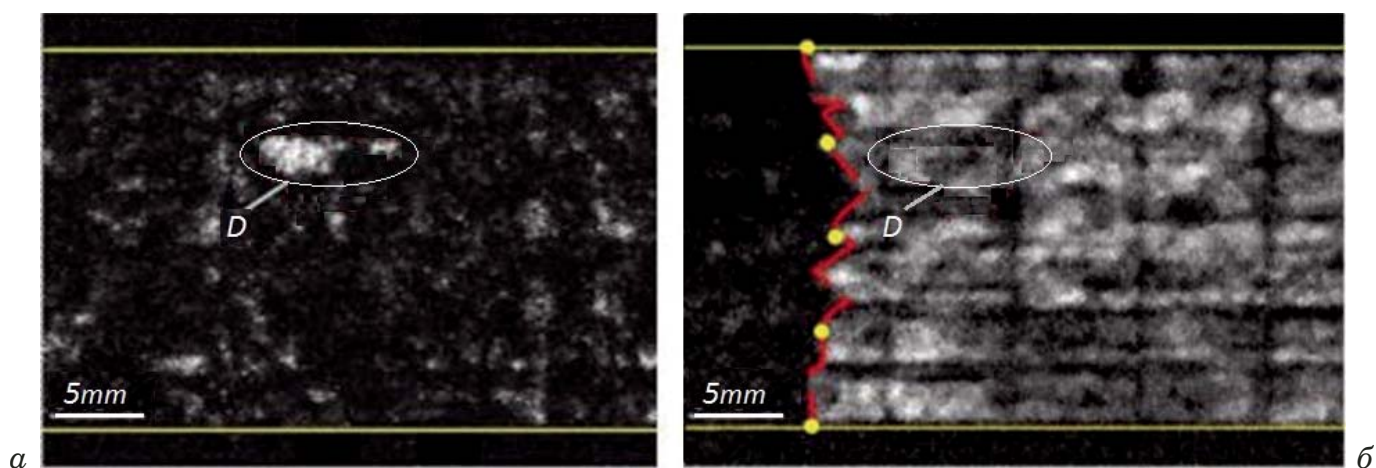


Рис. 4. Акустические изображения (С-сканы) образца углепластика на границе 15-го и 16-го (а), а также 16-го и 17-го (б) слоев (основной дефект): границы образца обозначены горизонтальными линиями; овалом выделена область дефекта (D) размером 4×9 мм

Fig. 4. Acoustic images (C-scans) of the CFRP sample at the interface of 15 and 16 (a), 16 and 17 layers (b) (the main defect). The boundaries of the sample are indicated by horizontal lines. Oval indicates the area of defect (D) 4×9 mm in size

Заклучение

Представлены результаты исследований по методике определения вязкости разрушения по моде сдвига G_{IIc} на образцах без инициатора трещины с использованием метода акустической микроскопии. Значения G_{IIc} определяли для трещины, образованной сдвигом, путем нагружения в условиях трехточечного изгиба после расклинивания.

Показано, что метод импульсной акустической микроскопии позволяет определять положение фронта трещины в образцах из углепластика

на глубине 3,0 – 3,5 мм с разрешением 100 мкм при частоте зондирующего излучения 50 МГц. В ходе экспериментов установлено, что отличие средних значений G_{IIc} , определенных с помощью стандартного ультразвукового контроля (4 МГц) и метода акустической микроскопии, не превышает 1,2 %. Для исследуемых композитных образцов наблюдалась разнообразная форма фронта трещины как исходной при расклинивании, так и по мере ее дальнейшего роста. При этом соответствующая величина вязкости G_{IIc} на каждом из этапов существенно не изменялась; по-видимому, параметр G_{IIc} не зависит от из-

Положение эффективного фронта трещин для образцов углепластика при расклинивании и прорастивании (значения для вязкости разрушения получены по результатам акустической микроскопии)

Position of the effective front of the crack for CFRP samples during wedging and sprouting (values for fracture toughness were obtained using the results on acoustic microscopy)

№ образца	Этап 1			Этап 2		
	Положение эффективного фронта a , мм		Вязкость разрушения G_{IIc}/G_{IIc}	Положение эффективного фронта a , мм		Вязкость разрушения G_{IIc}/G_{IIc}
	УЗК	АМ		УЗК	АМ	
1	28	29,0	1,06	69	69,9	1,09
2	36	34,3	0,94	60	62,2	1,03
3	36	34,2	1,18	64	66,7	0,90
4	35	32,7	0,94	60	62,2	1,09
5	37	34,2	1,00	62	65,1	0,96
6	36	34,2	1,03	62	65,7	1,14
7	42	39,4	0,78	69	71,5	0,88
8	35	33,5	1,07	69	71,1	0,89
9	34	32,7	1,00	60	63,6	1,00
Среднее значение	35,4	33,8	1	63,9	66,4	1
Коэффициент вариации, %	10	8	11	6	5	10

ломанности фронта трещины. Опыты показали, что для более точного нахождения положения эффективного фронта трещины при определении G_{IIc} увеличение числа точек выше рекомендованных стандартами нецелесообразно. Методами акустической микроскопии выявлены особенности распространения фронта трещины при ее росте в условиях сдвига. Высокое разрешение метода позволяет наблюдать динамику изменения формы фронта трещины и исследовать механизмы распространения трещин в композиционном материале.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в соответствии с соглашением № RFMEFI62518X0044. Авторы выражают глубокую благодарность Индустриальному партнеру работы — ПАО «Иркут».

ЛИТЕРАТУРА

1. Pettit D. E., Lauraitis K. N., Cox J. M. Advanced residual strength degradation rate modeling for advanced composite structures / AFWAL-TR-79-3095. Vol. I. Task I: preliminary screening, 1979.
2. Loss of Rudder in Flight Air Transat Airbus A310-308 C-GPAT, Miami, Florida, 90 nm S, 6 March 2005, Transportation Safety Board of Canada / Report Number A05F0047, 2005.
3. Schoen J., Nyman T., Blom A., Ansell H. A numerical and experimental investigation of delamination behavior in the DCB specimen / Composite Science and Technology. 2000. Vol. 60. N 2. P. 173 – 184.
4. Perez Carlos L., Davidson Barry D. Evaluation of Precracking Methods for the End-Notched Flexure Test / AIAA Journal. 2007. Vol. 45. N 11. P. 2603 – 2611.
5. Frossard G., Cugnoni J., Gmür T., Botsis J. Ply thickness dependence of the intralaminar fracture in thin-ply carbon-epoxy laminates / Composites Part A. 2018. N 109. P. 95 – 104.
6. Jones R., Kinloch A. J., Hu W. Cyclic-fatigue crack growth in composite and adhesively bonded structures: The FAA slow crack growth approach to certification and the problem of similitude / International Journal of Fatigue. 2016. Vol. 88. N 10. P. 8.
7. Яковлев Н. О., Гуляев А. И., Лашов О. А. Трещиностойкость слоистых полимерных композиционных материалов (обзор) / Труды ВИАМ. 2016. № 4(40). С. 106 – 114.
8. Крылов В. Д., Яковлев Н. О., Курганова Ю. А., Лашов О. А. Межслоевая трещиностойкость конструкционных полимерных композиционных материалов / Авиационные материалы и технологии. 2016. № 1(40). С. 79 – 85.
9. Яковлев Н. О., Гуляев А. И., Крылов В. Д., Шуртков С. В. Микроструктура и свойства конструкционных композиционных материалов при испытании на статическую межслоевую трещиностойкость / Новости материаловедения. Наука и техника. 2016. № 1(19). С. 65 – 74.
10. Funaria M. F., Grecoa F., Lonettia P., Lucianob R., Penna R. An interface approach based on moving mesh and cohesive modeling in Z-pinned composite laminates / Composites Part B. 2018. N 135. P. 207 – 217.
11. Krueger R. Computational fracture mechanics for composites. State of the art and challenges. Presented at the NAFEMS Nordic Seminar: Prediction and Modelling of Failure Using FEA. — Copenhagen/Roskilde, Denmark, 2006.
12. Pascoe J. A., Alderliesten R. C., Benedictus R. Methods for the prediction of fatigue delamination growth in composites

- and adhesive bonds — A critical review / Engineering Fracture Mechanics. 2013. Vol. 112 – 113. P. 72 – 96.
13. Xie J., Waas A. M., Rassaian M. Estimating the process zone length of fracture tests used in characterizing composites / International Journal of Solids and Structures. 2016. N 100 – 101. P. 111 – 126.
 14. Clay S. How ready are progressive damage analysis tool? / Composites World. July 2017. Vol. 3. N 7. P. 8 – 10.
 15. ASTM D7905/D7905M-14. Standard Test Method for Determination of the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
 16. ГОСТ 33685–2015. Метод определения удельной работы расслоения в условиях сдвига G_{IIc} . Композиты полимерные. — М.: Стандартинформ, 2016.
 17. Закутайлов К. В., Левин В. М., Петронюк Ю. С. Ультразвуковые методы высокого разрешения: визуализация микроструктуры и диагностика упругих свойств современных материалов (обзор) / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. Т. 75. № 8. С. 28 – 34.
 18. Petronyuk Y., Morokov E., Levin V., Ryzhova T., Chernov A., Sherbakov V., Shanygin A. Study of failure mechanisms of CFRP under mechanical load by impulse acoustic microscopy / Polymer Engineering Science. 2017. N 57. P. 703 – 708.
 19. Morokov E. S., Levin V. M. Spatial Resolution of Acoustic Microscopy in the Visualization of Interfaces inside a Solid / Acoustical Physics. 2019. N. 65. P. 165 – 170.

REFERENCES

1. Pettit D. E., Lauraitis K. N., Cox J. M. Advanced residual strength degradation rate modeling for advanced composite structures / AFWAL-TR-79-3095. Vol. I. Task I: preliminary screening, 1979.
2. Loss of Rudder in Flight Air Transat Airbus A310-308 C-GPAT, Miami, Florida, 90 nm S, 6 March 2005, Transportation Safety Board of Canada / Report Number A05F0047, 2005.
3. Schoen J., Nyman T., Blom A., Ansell H. A numerical and experimental investigation of delamination behavior in the DCB specimen / Composite Science and Technology. 2000. Vol. 60. N 2. P. 173 – 184.
4. Perez Carlos L., Davidson Barry D. Evaluation of Precracking Methods for the End-Notched Flexure Test / AIAA Journal. 2007. Vol. 45. N 11. P. 2603 – 2611.
5. Frossard G., Cugnoni J., Gmür T., Botsis J. Ply thickness dependence of the intralaminar fracture in thin-ply carbon-epoxy laminates / Composites Part A. 2018. N 109. P. 95 – 104.
6. Jones R., Kinloch A. J., Hu W. Cyclic-fatigue crack growth in composite and adhesively bonded structures: The FAA slow crack growth approach to certification and the problem of similitude / International Journal of Fatigue. 2016. Vol. 88. N 10. P. 8.
7. Yakovlev N. O., Gulyaev A. N., Lashov O. A. Crack resistance of layered polymer composite materials (overview) / Trudy VIAM. 2016. N 40. P. 106 – 114 [in Russian].
8. Krylov V. D., Yakovlev N. O., Kurganova Yu. A., Lashov O. A. Interlaminar fracture toughness of structural polymeric composite materials / Aviat. Mater. Tekhnol. 2016. N 1(40). P. 79 – 85 [in Russian].
9. Yakovlev N. O., Gulyaev A. N., Krylov V. D., Shurtakov S. V. Microstructure and properties of structural composite materials tested for static interlayer crack resistance / Nov. Materialoved. Nauka Tekhn. 2016. N 19. P. 65 – 74 [in Russian].
10. Funaria M. F., Grecoa F., Lonettia P., Lucianob R., Penna R. An interface approach based on moving mesh and cohesive modeling in Z-pinned composite laminates / Composites Part B. 2018. N 135. P. 207 – 217.
11. Krueger R. Computational fracture mechanics for composites. State of the art and challenges. Presented at the NAFEMS Nordic Seminar: Prediction and Modelling of Failure Using FEA. — Copenhagen/Roskilde, Denmark, 2006.

12. **Pascoe J. A., Alderliesten R. C., Benedictus R.** Methods for the prediction of fatigue delamination growth in composites and adhesive bonds — A critical review / *Engineering Fracture Mechanics*. 2013. Vol. 112 – 113. P. 72 – 96.
13. **Xie J., Waas A. M., Rassaianc M.** Estimating the process zone length of fracture tests used in characterizing composites / *International Journal of Solids and Structures*. 2016. N 100 – 101. P. 111 – 126.
14. **Clay S.** How ready are progressive damage analysis tool? / *Composites World*. July 2017. Vol. 3. N 7. P. 8 – 10.
15. ASTM D7905/D7905M-14. Standard Test Method for Determination of the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
16. State Standard GOST 33685–2015. Method for determining the specific work of delamination under shear conditions G_{IIc} . Polymer composites. — Moscow: Standartinform, 2016 [in Russian].
17. **Zakutailov K. V., Levin V. M., Petronyuk Yu. S.** High-resolution ultrasonic ultrasound methods: Microstructure visualization and diagnostics of elastic properties of modern materials (Review) / *Inorganic Materials*. 2010. Vol. 46. N 15. P. 1655.
18. **Petronyuk Y., Morokov E., Levin V., Ryzhova T., Chernov A., Sherbakov V., Shanygin A.** Study of failure mechanisms of CFRP under mechanical load by impulse acoustic microscopy / *Polymer Engineering Science*. 2017. N 57. P. 703 – 708.
19. **Morokov E. S., Levin V. M.** Spatial Resolution of Acoustic Microscopy in the Visualization of Interfaces inside a Solid / *Acoustical Physics*. 2019. N. 65. P. 165 – 170.