

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ УГЛЕПЛАСТИКА С ДИАГНОСТИРОВАНИЕМ МИКРОСТРУКТУРНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ СРЕДСТВАМИ АКУСТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ

П.В. Шершак^{1*}, В.М. Левин², В.А. Косарев³, Е.С. Мороков², Ю.С. Петронюк²

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации – ФГУП «ВИАМ», ул. Радио, д.17, Москва, 105005, Российская Федерация

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук – ФГБУН ИБХФ РАН, ул. Косыгина, д.4, Москва, 119334, Российская Федерация

³Открытое акционерное общество «Национальный институт авиационных технологий» - ОАО НИАТ, ул. Кировоградская, д.3, Москва, 117587, Российская Федерация

*e-mail: tweek@list.ru

Аннотация. Проведен анализ процесса разрушения образцов углепластика при растяжении. Для наглядного представления результатов предварительных расчетов приводится набор эпюр разрушения образцов при различных нагрузках для слоев с разными углами армирования. Изготовленные образцы углепластика нагружались поэтапно до нагрузок, при которых начинается и развивается процесс разрушения. С целью визуализации объемной микроструктуры образцов приводятся данные акустической микроскопии, которая проводилась после каждого этапа нагружения образцов. В результате изучения динамики разрушений структуры образцов были сделаны выводы о корректности используемых расчетных методов анализа разрушений и возможности диагностирования разных стадий процесса разрушения в углепластике средствами акустической микроскопии.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, углепластик, процесс разрушения, микроструктура, методика расчета, диагностика, дефекты, неразрушающий контроль, акустическая микроскопия

1. Введение

Процесс развития разрушений в полимерных композиционных материалах (ПКМ) является одним из важнейших факторов, который необходимо учитывать при проектировании деталей и агрегатов из ПКМ для авиационной техники [1-3].

На сегодняшний день задача создания прогнозирующих моделей поведения ПКМ на микроуровне под воздействием внешних нагрузок не решена в полной мере. Это связано с тем, что создание таких моделей требует учета множества различных факторов, таких как: анизотропия материала, особые свойства отдельных его компонентов, последовательность и направление укладки слоев, различие форм

разрушения, эффект от их взаимного влияния и пр. [4]. При такой сложной постановке задачи требуются эффективные методы анализа процессов разрушения и диагностирования изменений внутренней структуры материала [5,6].

Следует отметить, что традиционные методы исследования процессов разрушения ПКМ, такие как микроскопия, не позволяют наблюдать изменения микроструктуры в объеме материала, а только в поверхностном и подповерхностных слоях [7]. Большая часть полученных данных при исследовании механизмов разрушений проводилась по изломам испытанных образцов, что давало информацию о финальной стадии разрушения. Экспериментальных данных о начале и развитии процесса разрушения на сегодняшний день получено очень мало.

Настоящая работа посвящена расчетному анализу и выявлению динамики развития структурных разрушений в слоистом углепластике под действием растягивающей нагрузки. Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2: «Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов, неразрушающий контроль» в соответствии со Стратегическими направлениями развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года. [1].

2. Образцы для испытаний

Образцы для испытаний на растяжение изготовлены методом прямого прессования из углеродного препрега марки M21-T700-123 (9 слоев, толщина слоя 0.123 мм). Размеры образцов и количество слоев препрега выбраны исходя из возможностей современного оборудования для акустической микроскопии. Эскиз образца для испытаний приведен на Рис. 1 (светлым цветом обозначена рабочая область образца, темным – места приклейки накладок для установки образца в захватах разрывной машины). В центре образца имеется отверстие для создания мест концентрации напряжений.

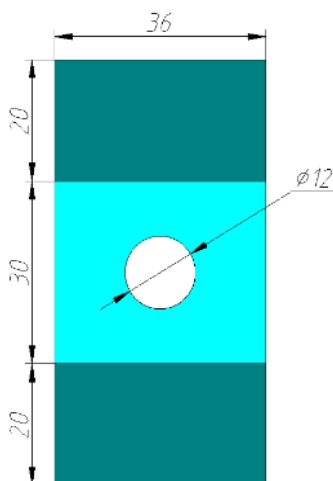


Рис. 1. Образец для испытаний на растяжение

С целью уточнения зон зарождения предполагаемого разрушения был проведен предварительный анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) образца методом конечных элементов. Анализ проводился для рабочей области образца, места установки захватов испытательной машины моделировались в виде жесткой заделки. В качестве начальных условий слоистая структура ПКМ принята как пакет с равным процентным содержанием однонаправленных слоев, уложенных в направлениях 0° , $\pm 45^\circ$ и 90° , с физико-механическими характеристиками, полученными на основании

проведенной серии испытаний элементарных образцов. На этапе предварительного анализа, в силу симметрии рассматриваемой слоистой структуры ПКМ, для оценки НДС образцов использовались значения эквивалентных напряжений по Мизесу.

Наличие в образце концентратора в виде отверстия приводит к образованию локальной концентрации действующих напряжений, что позволяет достоверно определить зоны зарождения будущих разрушений в образце [8]. Эпюра распределений максимальных эквивалентных напряжений в образце на растяжение показана на Рис. 2.

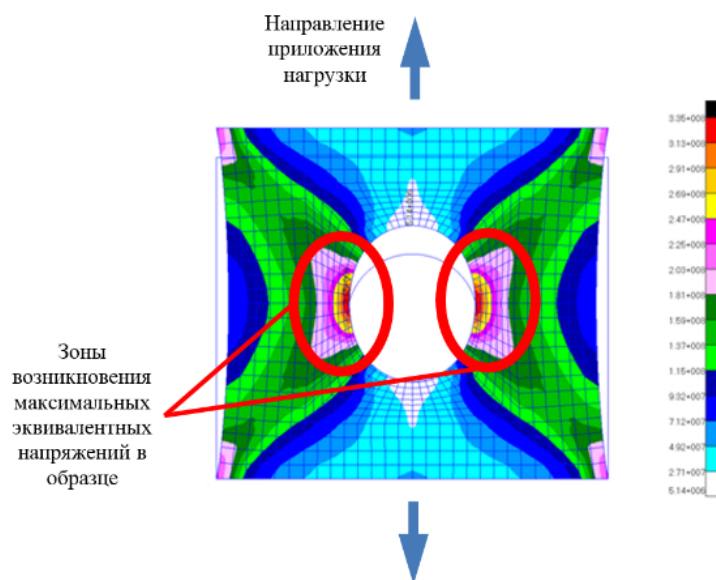


Рис. 2. Эпюра распределения максимальных эквивалентных напряжений в рабочей зоне образца на растяжение

Важно отметить, что при расчете изделий из ПКМ, нельзя оценивать прочность конструкции по эквивалентным напряжениям в связи с сильной анизотропией материала, а также существенной разнородностью структуры по толщине конструкции. Поэтому, анализ прочности ПКМ следует проводить для каждого слоя в отдельности, рассматривая действующие напряжения в слоях в виде компонент (вдоль направления волокон, поперек и в плоскости слоя). Для определения НДС в слоях образцов использовались значения компонент действующего потока сил и моментов (N_x , N_y , N_{xy} , M_x , M_y , M_{xy}). Проведенные расчеты значений потоков сил в образце с отверстием показывают, что возможно дополнительно сузить зону возникновения разрушений, используя для этого отдельный слой. Для этого следует выбирать схему армирования образца такой, чтобы полученное в результате распределение напряжений по слоям имело явно выраженные области концентрации.

На основании анализа послойного распределения компонент действующего напряжения в ПКМ для инициации разрушений в центре образца (по его толщине) выбраны следующие две схемы армирования, отличающиеся направлением центрального слоя:

1. $[(\pm 45)_2/\bar{0}]_s$;
2. $[(\pm 45)_2/\bar{90}]_s^1$,

Далее образцы со схемами армирования 1 и 2 будут обозначаться как Р.0° и Р.90° соответственно.

¹ Обозначение направлений армирования приведено в соответствии с ГОСТ Р 56683-2015.

3. Анализ процесса разрушения

В качестве критерия разрушения для классификации оценки повреждения в ПКМ выбран интерактивный квадратичный критерий разрушения Hashin [9]. Данный критерий описывает четыре формы разрушения в случае ПКМ армированного однонаправленными слоями:

- разрушение волокна при растяжении;
- разрушение волокна при сжатии;
- разрушение матрицы при растяжении;
- разрушение матрицы при сжатии.

Для оценки остаточной прочности образца после момента возникновения повреждения применяется мгновенная модель деградации свойств материала, сформулированная Samanho и Matthews [10]. Согласно данной модели деградации, в случае возникновения разрушения происходит мгновенная корректировка соответствующих модулей упругости материала. В качестве метода моделирования повреждения композита применяется подход прямой деградации свойств материала (MPDM метод), сущность которого заключается в замене материала для поврежденного слоя на эквивалентный однородный слой из материала со сниженными жесткостными характеристиками согласно принятой модели деградации. Коэффициент редуцирования свойств принят равным 0.01.

Анализ процесса разрушения образцов проводился с помощью методики численного анализа механики разрушения композиционного материала [11] в специализированной программе «МИЛАНА» [12], которая автоматизировано управляет анализом разрушения материала в процессе расчета. В результате проведенного анализа установлены значения нагрузок, при которых начинается разрушение и значения предельной прочности (максимальной несущей способности) образцов.

Также были получены расчетные диаграммы «нагрузка-деформация» образцов и проведен детальный анализ процесса разрушения с его визуализацией для разных слоев с учетом указанных ранее форм разрушения.

На примере образца P.0° анализ проводился следующим образом. Кривая на полученной расчетной диаграмме «нагрузка-деформация» (Рис. 3) условно делилась точками А-Г на несколько ключевых участков.

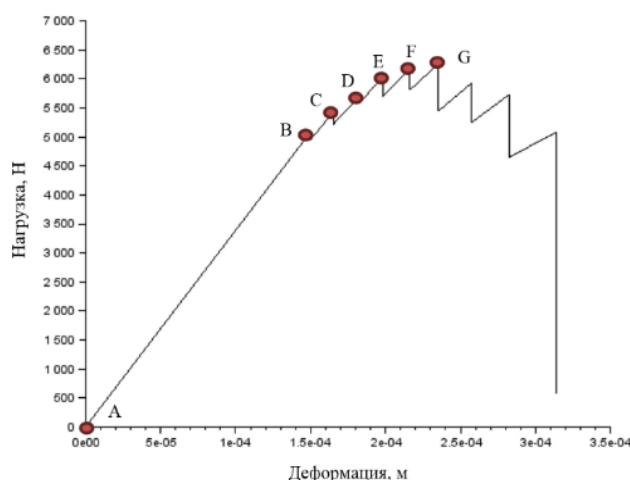


Рис. 3. Диаграмма «нагрузка-деформация» образца P.0°, полученная расчетным способом

Для каждого участка кривой были получены эпюры разрушения образца для слоев с отличными друг от друга направлениями укладки ($+45^\circ$, -45° и 90°). С целью визуализации на эпюрах данных о различных формах разрушения образца принята цветовая гамма, приведенная на Рис. 4.

На участке А-В (от 0 до 5.1 кН), согласно проведенным расчетам отсутствуют разрушения в образце. Участок характеризуется линейно-упругой областью деформирования. В точке В (5.1 кН) по расчетам происходит начало зарождения повреждений в центральном слое 0° .

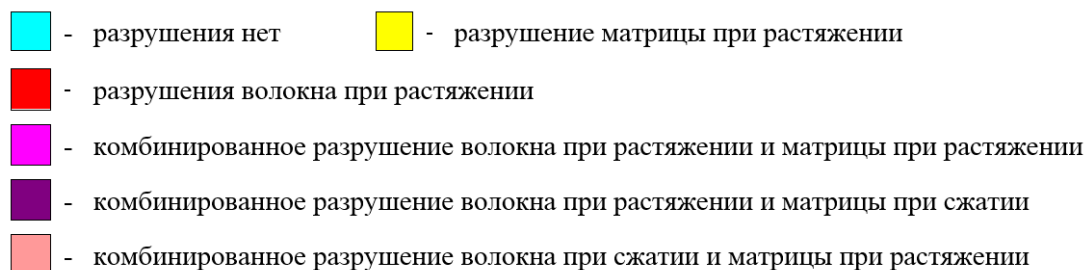


Рис. 4. Цветовая гамма визуализации форм разрушения

Участок В-С (от 5.1 кН до 5.4 кН) характеризуется образованием локальных разрушений матрицы и волокон в слоях, армированных под углами $\pm 45^\circ$, а также продолжением развития разрушений волокна в центральном слое (0°). Эпюры разрушения рабочей зоне образца (согласно Рис. 1 и принятой цветовой гамме) по слоям в точке С приведены на Рис. 5.

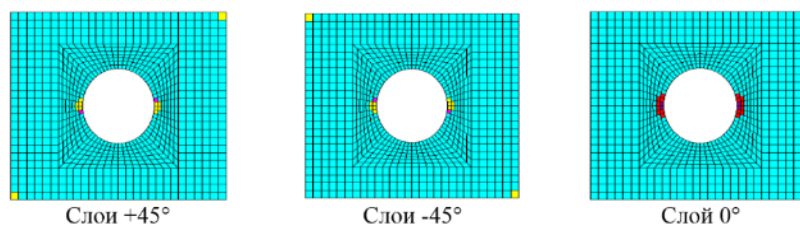


Рис. 5. Эпюры разрушения образца Р.0° слоях при нагрузке 5.4 кН

На участке С-Д (от 5.4 кН до 5.6 кН) отмечается дальнейшее незначительное развитие разрушений образца во всех слоях.

Участок D-E (от 5.6 кН до 6.0 кН) характеризуется развитием процесса разрушения матрицы в слоях $\pm 45^\circ$ и 0° . Образовываются новые зоны зарождения разрушений в центральном слое. Развитие зон разрушения слоя 0° приводит к заметному падению жесткости образца. Эпюры разрушения образца в слоях для точки Е приведены на Рис. 6.

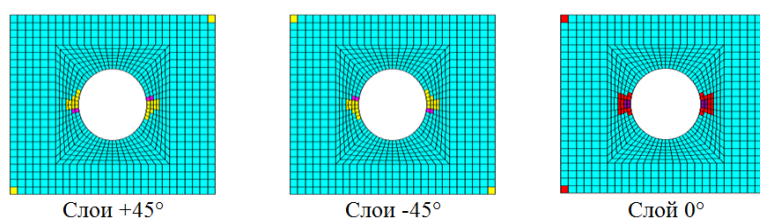


Рис. 6. Эпюры разрушения образца Р.0° в слоях при нагрузке 6.0 кН

Участок E-F (от 6.0 кН до 6.16 кН) сопровождается дальнейшим развитием разрушения волокон в слоях $\pm 45^\circ$ и 0° , что приводит к существенному падению жесткости образца. На участке F-G достигается величина максимальной несущей способности образца (6.2кН). Область развития разрушения в слоях охватывает половину его ширины. Эпюры разрушения образца в слоях для точки G приведены на Рис. 7.

Дальнейшее растяжение образца сопровождается снижением несущей нагрузки и приводит к его окончательному разрушению.

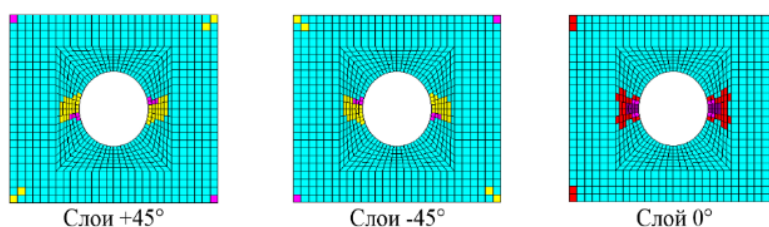


Рис. 7. Эпюры разрушения образца P.0° в слоях при нагрузке 6.2 кН

Аналогичным образом проводится анализ процессов разрушения для образца P.90°. Диаграмма «нагрузка-деформация» образца P.90° полученная расчетным способом приведена на Рис.8. Некоторые из эпюр разрушений образца P.90° при разных значениях нагрузки для соответствующих участков диаграммы «нагрузка-деформация» приведены на Рис. 9.

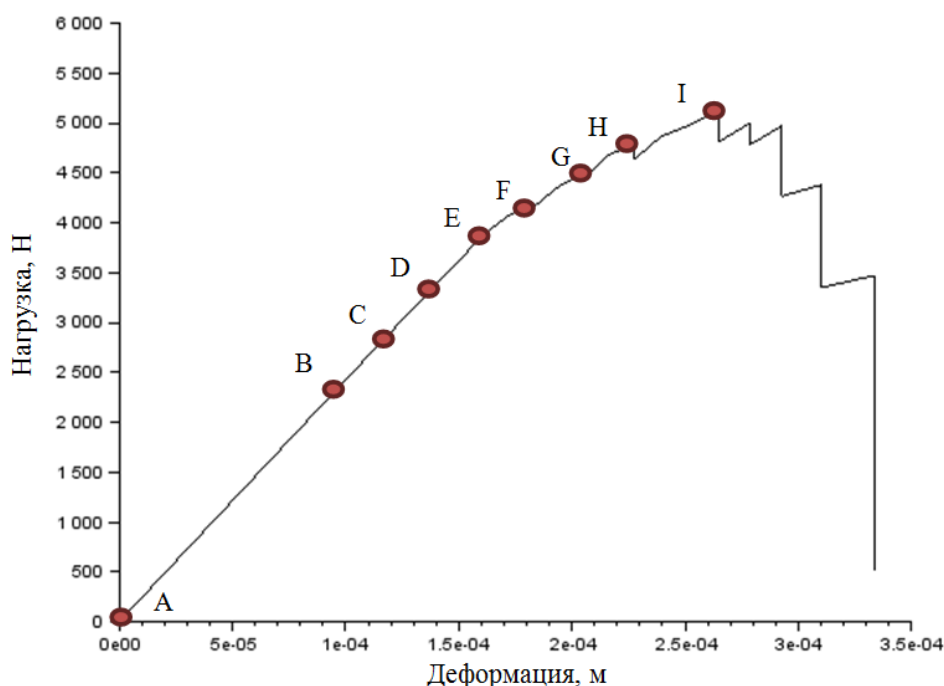


Рис. 8. Диаграмма «нагрузка-деформация» образца P.90°, полученная расчетным способом

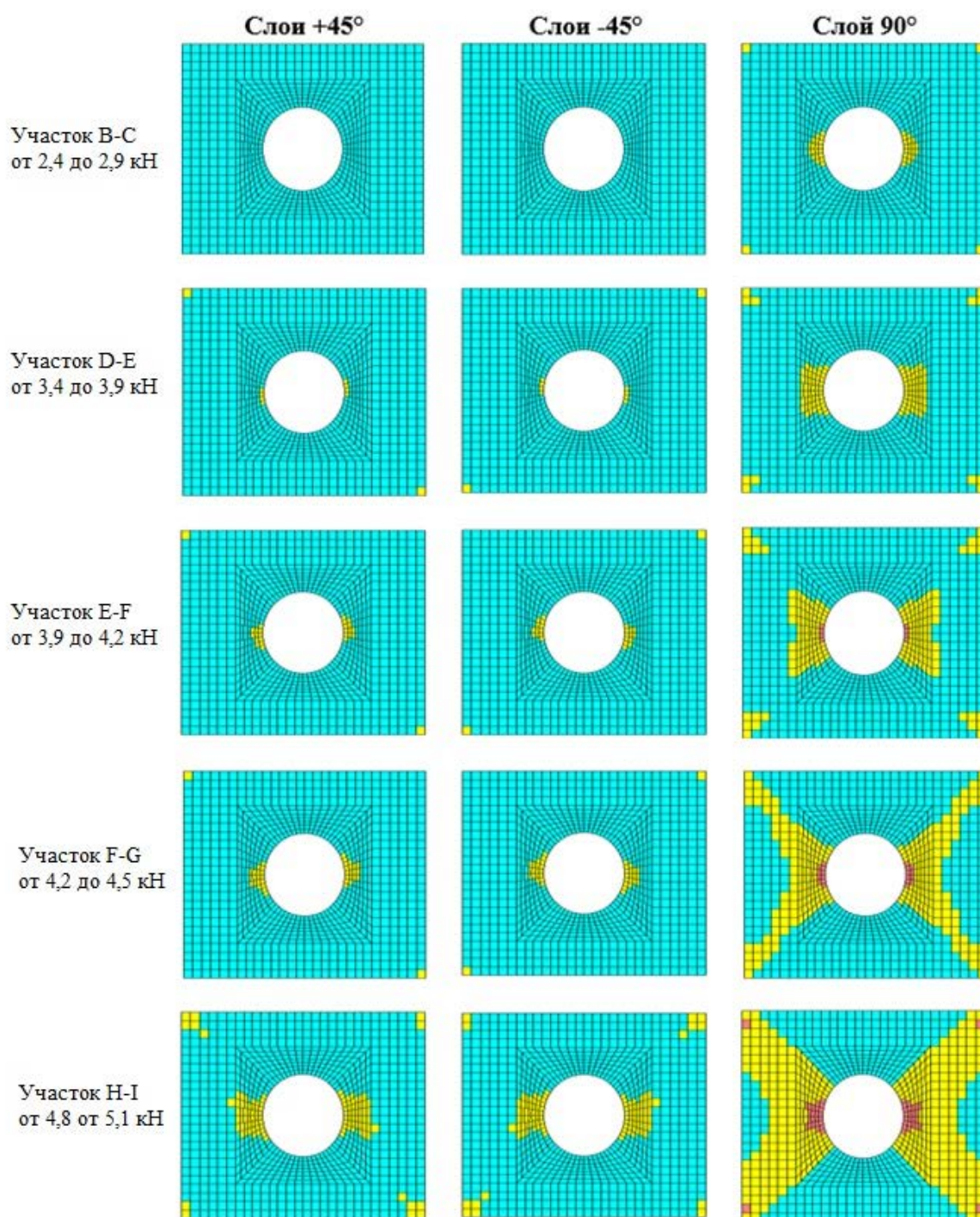


Рис. 9. Эпюры разрушения образца Р.90° в слоях при разных значениях нагрузки

4. Метод импульсной акустической микроскопии

С целью экспериментального исследования микроструктуры образцов использовался метод акустической микроскопии, позволяющий выявлять внутренние микродефекты структуры в слоистых углепластиках [13]. Для исследования образцов данным методом использовался акустический микроскоп СИАМ, разработанный в Лаборатории акустической микроскопии Института биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН (ИБХФ РАН) (Рис. 10).

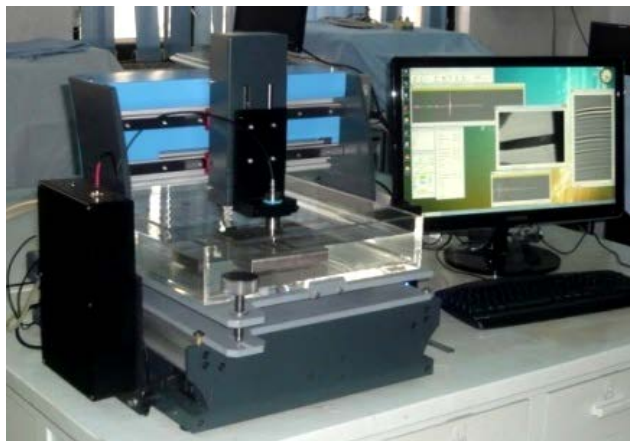


Рис. 10. Внешний вид сканирующего импульсного акустического микроскопа СИАМ

В основе метода акустической микроскопии лежит применение сфокусированного ультразвукового пучка. Основную информацию о контролируемой зоне получают от сигнала, отраженного из фокальной зоны. Пришедший акустический сигнал преобразуется в электрический, оцифровывается и хранится в памяти компьютера вместе с координатами точки измерения (А-скан). Далее собирается информация из соседних точек, формируя базу для визуализации (В и С-сканы) [14,15].

По физике процесса метод акустической микроскопии схож с традиционным методом эхоимпульсного ультразвукового контроля [16], но имеет ряд существенных отличий от последнего. Например, существенно большие рабочие частоты, которые при исследовании образцов в настоящей работе составляют 50-100 МГц. В данном диапазоне частот слоистый ПКМ воспринимается как система анизотропных слоев, на границах которых ультразвуковое излучение испытывает отражение и преломление, что позволяет успешно визуализировать несовершенства и повреждения микроструктуры ПКМ. По сравнению с методом компьютерной томографии, акустическая микроскопия обладает рядом значительных преимуществ, а именно полной безопасностью и менее критичными ограничениями по габаритам исследуемого объекта при почти одинаковой чувствительности (разрешающей способности).

5. Результаты

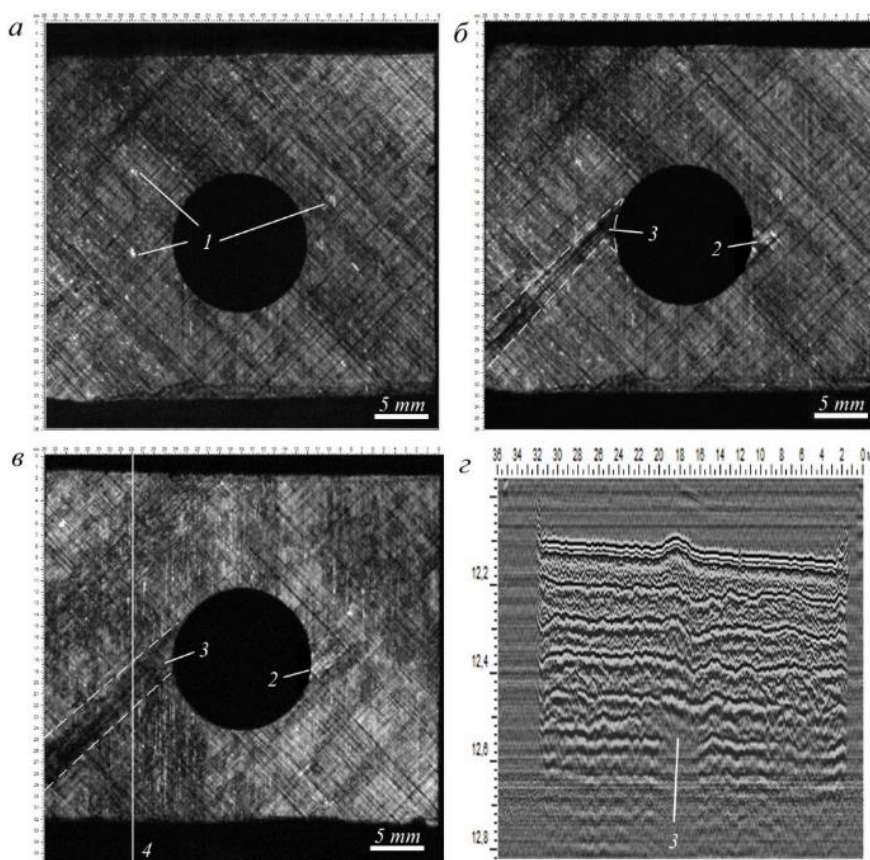
К изготовленным образцам прикладывались нагрузки, при которых согласно расчетам начинается разрушение. Далее следовала серия поэтапных нагружений до нагрузок, соответствующих приведённым эпюрам разрушений. После каждого этапа нагружения образцы исследовались методом акустической микроскопии.

В ходе сравнительного анализа результатов теоретического расчета с экспериментальными данными по разрушениям структуры углепластика, наблюдаемых методами импульсной акустической микроскопии было установлено следующее.

Трёхмерная визуализация объемной микроструктуры образца с укладкой слоев $[(\pm 45)_2/\bar{0}]_s$ показывает, что под действием растягивающей нагрузки в образце возникают разрушения на границах центрального слоя (5ого по счету слоя с направлением армирования 0^0). Акустические изображения демонстрируют, что при нагрузках менее 5,1 кН, соответствующих линейному участку кривой нагружения, разрушения структуры, помимо технологических дефектов, не наблюдается.

Акустические изображения микроструктуры образца вблизи центрального армирующего слоя для границы 4ого (-45°) и 5ого (0°) слоев после приложения нагрузки 5.1 кН и 6.2 кН приведены на Рис. 11а и Рис. 11б соответственно. На Рис. 11в

представлена структура границы 5ого (0°) и 6ого (-45°) слоев после приложения нагрузки 6.2 кН. Структура поперечного сечения образца при той же нагрузке приведена на Рис. 11г.



- 1 – технологические дефекты пропитки, 2 – образованные межслоевые расслоения.
 3 – тень от протяженного дефекта вблизи центрального слоя. 4 – положение В-скана.
 а) граница 4ого и 5ого слоя (-45°/0°) после нагрузки до 5.1 кН,
 б) граница 4ого и 5ого слоя (-45°/0°) после нагрузки до 6.2 кН,
 в) граница 5ого и 6ого слоя (0°/-45°) после нагрузки до 6.2 кН,
 (г) изображение вертикального сечения образца.

Рис. 11. Акустические изображения образца с ориентацией слоев $[(\pm 45)_2/\bar{0}]_s$ после приложения растягивающей нагрузки

Из представленных акустических изображений видно, что структурные изменения концентрируются в области центрального слоя ориентированного вдоль приложенной нагрузки и прилегающих к нему слоев с ориентацией -45°. Развитие дефектов вокруг центрального слоя возникает в виде межслоевых отслоений на противоположных краях отверстия – концентратора напряжений. Отслоения имеют сложную топологию с переходом между границами слоев, некоторая часть отслоения (2) включает яркие области. Оставшаяся часть дефектной области (2) и практически вся область (3) на акустическом изображении оказываются темными – они представляют собой тени от расслоений, расположенных выше отображаемого слоя. Эти зоны расслоений на акустических изображениях соответствуют разрушениям, предсказанным в рамках теоретических расчетов и указанных на эпюрах разрушения, на концах диаметра отверстия, перпендикулярного оси приложения нагрузки (Рис. 7).

Акустические изображения (Рис. 11 б,в) показывают, что структурные нарушения (2) и (3) распространяются вглубь образца вдоль укладки армирующих волокон под углом 45° к направлению приложенной нагрузки. Фронт расслоений имеет клиновидную форму и направлен от центрального отверстия (концентратора напряжений) к границам образца.

На изображении вертикального сечения образца (Рис. 11г), сделанного вдоль линии, обозначенной (4) на Рис. 11в, наблюдается теневая область (3) от дефекта, расположенного ниже центрального 5-го слоя. На акустическом изображении в этом сечении ниже 5-го слоя видна деформация (искривление) слоев, приводящая к замятию высотой 15 мкм на поверхности образца. Дальнейшее нагружение образцов приводит к их разрушению при среднем значении нагрузки 6.9 кН, что на 11% выше предельной нагрузки, полученной при теоретическом расчете. В то же время среднее значение разрушающей нагрузки для образцов со схемой армирования $[(\pm 45)_2/90]_s$ составляет 4.7 кН, что на 8% ниже разрушающей нагрузки, полученной при расчете.

6. Заключение

Визуализация разрушений структуры в объеме образца частично подтверждает картину разрушения, полученную путем теоретического моделирования. Наилучшим образом могут быть сопоставлены результаты теоретического и экспериментального исследования по краям отверстия.

Результаты расчетного анализа процесса разрушения в углепластике подтверждаются полученными с помощью акустического микроскопа изображениями, а также результатами физико-механических испытаний, что позволяет сделать вывод об эффективности использованного метода расчета.

Применение импульсной акустической микроскопии (в частности использование микроскопа СИАМ) показало, что данный метод позволяет диагностировать начало и развитие разрушений в слоистом углепластике при воздействии нагрузки, включая визуализацию наличия и роста количества отслоений армирующего наполнителя от матрицы. Следует отметить, необходимость дальнейшего развития метода импульсной акустической микроскопии как метода неразрушающего контроля и его активное внедрение в практику исследований изменения микроструктуры ПКМ при воздействии внешних факторов.

Благодарности. Никакого внешнего финансирования для этого исследования получено не было.

Литература

- [1] Каблов ЕН. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года. *Авиационные Материалы и Технологии*. 2012;S: 7-17.
- [2] Каблов ЕН. Материалы для авиакосмической техники. Все материалы. *Энциклопедический справочник*. 2007;5: 7-27.
- [3] Раскутин АЕ. Стратегия развития полимерных композиционных материалов. *Авиационные материалы и технологии*. 2017;S: 344-348.
- [4] Амелина ЕВ, Голушко СК, Ерасов ВС, Идимешев СВ, Немировский ЮВ, Семисалов Б.В., Юрченко АВ, Яковлев НО. Анализ и обработка экспериментальных данных при деформировании полимеров и углепластиков. *Омский Научный Вестник*. 2015;3(134): 339-344.
- [5] Каблов ЕН. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники. *Авиационные Материалы и Технологии*. 2001;1: 3-8.

- [6] Мурашов ВВ, Косарина ЕИ, Генералов АС. Контроль качества авиационных деталей из полимерных композиционных материалов и многослойных клееных конструкций. *Авиационные Материалы и Технологии*. 2013;3: 65-70.
- [7] Гуляев АИ, Яковлев НО, Крылов ВД, Лашов ОА. Применение фрактографического анализа при исследовании межслоевого разрушения ПКМ. *Авиационные Материалы и Технологии*. 2017;3: 65-74.
- [8] Ильичев АВ, Раскутин АЕ. Исследование влияния концентратора напряжений на напряженно-деформационное состояние углепластика методом корреляции цифровых изображений. *Авиационные Материалы и Технологии*. 2014;3: 62-66.
- [9] Davila CG, Camanho PP. Failure criteria for FRP laminates in plane stress. In: *44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. 2003. Available from: doi.org/10.2514/6.2003-1991.
- [10] Liu G. *Damage Progression in Open-Hole Tension Composite Laminates by the Element-Failure Method. Ph.D. Thesis*. 2008.
- [11] Косарев ВА, Шершак ПВ. Методика численного анализа механики разрушения композиционного материала в рамках плоской задачи теории упругости. В: *Сборник тезисы докладов первой международной конференции «Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций» DFCMS-2014*. 2014. с.45.
- [12] Косарев ВА, Азиков НС, Алипов АЕ. Методика решения физически нелинейных задач прочности конструкции с концентраторами напряжений. *Авиационная промышленность*. 2014;2: 26-31.
- [13] Мурашов ВВ, Румянцев АФ. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть 2. Методы выявления дефектов монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов. *Контроль. Диагностика*. 2007;5: 31-42.
- [14] Morokov E, Levin V, Chernov A, Shanygin A. High resolution ply-by-ply ultrasound imaging of impact damage in thick CFRP laminates by high-frequency acoustic microscopy. *Composite Structures*. 2021;256: 113102.
- [15] Закутайлов КВ, Левин ВМ, Петронюк ЮС. Ультразвуковые методы высокого разрешения: визуализация микроструктуры и диагностика упругих свойств современных материалов (обзор). *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2009;8: 28-34.
- [16] Мурашов ВВ, Генералов АС. Контроль изделий из ПКМ и многослойных клееных конструкций ультразвуковыми методами отражения. *Авиационные материалы и технологии*. 2017;1(46): 69-74.

RESEARCH OF FAILURE PROCESS OF CARBON FIBER REINFORCEMENT PLASTIC SPECIMENS WITH DIAGNOSING OF MICROSTRUCTURAL DESTRUCTION BY MEANS OF ACOUSTIC MICROSCOPY

P.V. Shershak^{1*}, V.M. Levin², V.A. Kosarev³, E.S. Morokov², Yu.S. Petronyuk²

¹Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation – VIAM, bld. 17, Radio st., Moscow, 105005 Russian Federation

²Emanuel Institute of Biochemical Physics of Russian Academy of Sciences – IBCP RAS, 4, Kosigina st., Moscow, 119334 Russian Federation

³Joint stock company «National institute of aviation technologies» - JSC NIAT, bld. 3, Kirovogradskaya st., 117587 Russian Federation

*e-mail: tweek@list.ru

Abstract. The analysis of failure process of carbon fiber reinforcement plastic (CFRP) samples under tension load is given. For a visual representation of the results of preliminary calculations, samples' failure set with different layers loads and different reinforcement lay-up is given. CFRP samples were loaded gradually up to the loads at which the failure process begins and develops. In order to visualize the volume microstructure of the samples the acoustic microscopy data which was carried out after each stage of sample loading is given. The research of the dynamic structure failure process in samples shows that the calculation method was used is correct and that the diagnosing of the failure process in carbon fiber samples at different stages by using methods of acoustic microscopy is possible.

Keywords: polymer composite material, carbon fiber reinforced plastic, failure process, microstructure, calculation procedure, diagnostic, defects, non-destructive test, acoustic microscopy

Acknowledgements. No external funding was received for this study.

References

- [1] Kablov EN. Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030. *Aviation Materials and Technologies*. 2012;S: 7-17. (In Russian)
- [2] Kablov EN. Materials for aerospace engineering. All materials. In: *Encyclopedic Reference Book*. 2007;5: 7-27. (In Russian)
- [3] Raskutin AE. Development strategy for polymer composite materials. *Aviation Materials and Technologies*. 2017;S: 344-348. (In Russian)
- [4] Amelina EV, Golushko SK, Yerasov VS, Idimeshev SV, Nemirovsky YuV, Semisalov BV, Yurchenko AV, Yakovlev NO. Analysis and processing of experimental data during

deformation of polymers and carbon plastics. *Omsk Scientific Bulletin*. 2015;3(134): 339-344. (In Russian)

[5] Kablov EN. Quality control of materials is a guarantee of the safety of aircraft operation. *Aviation Materials and Technologies*. 2001;1: 3-8. (In Russian)

[6] Murashov VV, Kosarina EI, Generalov AS. Quality control of aircraft parts made of polymer composite materials and multilayer glued structures. *Aviation Materials and Technologies*. 2013;3: 65-70. (In Russian)

[7] Gulyaev AI, Yakovlev NO, Krylov VD, Lashov OA. Application of fractographic analysis in the study of interlayer fracture of PCM. *Aviation Materials and Technologies*. 2017;3: 65-74. (In Russian)

[8] Ilyichev AV, Raskutin AE. Investigation of the influence of a stress concentrator on the stress-strain state of CFRP by the method of correlation of digital images. *Aviation Materials and Technologies*. 2014;3: 62-66. (In Russian)

[9] Davila CG, Camanho PP. Failure criteria for FRP laminates in plane stress. In: *44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. 2003. Available from: doi.org/10.2514/6.2003-1991.

[10] Liu G. *Damage Progression in Open-Hole Tension Composite Laminates by the Element-Failure Method*. Ph.D. Thesis. 2008.

[11] Kosarev VA, Shershak PV. A technique for numerical analysis of the fracture mechanics of a composite material in the framework of the plane problem of the theory of elasticity. In: *Abstracts of the first international conference "Deformation and Fracture of Composite Materials and Structures" DFCMS-2014*. 2014, p.45. (In Russian)

[12] Kosarev VA, Azikov NS, Alipov AE. Technique for solving physically nonlinear problems of structural strength with stress concentrators. *Aviation Industry*. 2014;2: 26-31. (In Russian)

[13] Murashov VV, Rumyantsev AF. Defects of monolithic parts and multilayer structures made of polymer composite materials and methods for their detection. Part 2. Methods for detecting defects in monolithic parts and multilayer structures made of polymer composite materials. *Control. Diagnostics*. 2007;5: 31-42. (In Russian)

[14] Morokov E, Levin V, Chernov A, Shanygin A. High resolution ply-by-ply ultrasound imaging of impact damage in thick CFRP laminates by high-frequency acoustic microscopy. *Composite Structures*. 2021;256: 113102.

[15] Zakutailov KV, Levin VM, Petronyuk YS. High-resolution ultrasonic methods: visualization of microstructure and diagnostics of elastic properties of modern materials (review). *Factory laboratory. Diagnostics of materials*. 2009;8: 28-34. (In Russian)

[16] Murashov VV, Generalov AS. Inspection of PCM products and multilayer glued structures by ultrasonic reflection methods. *Aviation materials and technologies*. 2017;1(46): 69-74. (In Russian)