

УДК 620.17

DOI: 10.15593/2224-9982/2023.72.09

**А.А. Балакирев¹, И.Л. Гладкий², Г.В. Мехоношин¹, А.Д. Куракин¹,
М.Ш. Нихамкин¹, Н.А. Саженов¹, С.В. Семенов¹, Д.Г. Соломонов¹**

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

²ОДК-Авиадвигатель, Пермь, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ТОЛСТЫХ СТЕРЖНЕЙ ИЗ СЛОИСТОГО УГЛЕПЛАСТИКА

В настоящей работе проведено комплексное экспериментальное исследование закономерностей усталостного разрушения толстых стержней из слоистого углепластика при двух схемах нагружения – циклическом растяжении и циклическом трехточечном изгибе на фоне предварительного статического растяжения. Наряду с параметрами нагружения, в процессе усталостного нагружения образцов непрерывно регистрировали резонансную частоту колебаний образца, параметры акустической эмиссии, поля деформаций и температур на поверхности образца.

Основным механизмом разрушения слоистого углепластика при обеих исследованных схемах нагружения является появление и развитие расслоений. Получены экспериментальные данные об изменении резонансной частоты колебаний образцов и параметров акустической эмиссии (количества событий в единицу времени и энергии событий) по мере усталостной наработки. Имеет место обусловленное появлением или резким прорастанием расслоений ступенчатое изменение количества событий акустической эмиссии, которое совпадает по времени с явлениями скачкообразного изменения резонансной частоты и появлением высокоэнергетических событий акустической эмиссии. В зонах усталостного разрушения возникают связанные с накоплением повреждений локальные области повышенного саморазогрева образцов.

Методом цифровой корреляции изображений получены поля трех компонент тензора деформаций на поверхности исследованных образцов в процессе усталостного нагружения. В зонах появления расслоений резко возрастает поперечная по отношению к плоскости укладки слоев ламината компонента деформаций.

Регистрация в процессе усталостного нагружения параметров акустической эмиссии, полей деформаций и температур, резонансной частоты колебаний позволяют в комплексе выявить факты и моменты появления и развития усталостных повреждений в образцах.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, слоистые углепластики, усталость, разрушение, корреляция цифровых изображений, акустическая эмиссия, инфракрасная термометрия, экспериментальное исследование.

**A.A. Balakirev¹, I.L. Gladkiy², G.V. Mekhonoshin¹, A.D. Kurakin¹,
M.Sh. Nikhamkin¹, N.A. Sazhenkov¹, S.V. Semenov¹, D.G. Solomonov¹**

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

² UEC-Aviadvigatel, Perm, Russian Federation

EXPERIMENTAL STUDY OF THE PATTERNS OF FATIGUE FAILURE OF THICK RODS MADE OF LAMINATED CARBON FIBER

In the present work, a comprehensive experimental study of the patterns of fatigue failure of thick rods made of laminated carbon fiber is carried out under two loading schemes: cyclic tension and cyclic three-point bending with static tension. In the process of fatigue loading, along with the loading parameters of the samples, the resonant vibration frequency of the sample, acoustic emission parameters, strain fields, and temperatures on the sample surface were continuously recorded.

The main mechanism of destruction of laminated carbon fiber in both studied loading schemes is the appearance and development of delaminations. Experimental data on the change in the resonant frequency of sample oscillations and the parameters of acoustic emission (the number of events per unit time and the energy of events) are obtained during fatigue testing. There is a stepwise change in the number of acoustic emission events due to the appearance or sharp growth of cracks, which coincides in time with the phenomena of an abrupt change in the resonant frequency and the appearance of high-energy acoustic emission events. In the zones of fatigue failure, local areas of increased self-heating of the samples appear.

The fields of three components of the strain tensor on the surface of the studied samples during the fatigue loading were obtained by the method of digital image correlation. In the zones of delaminations, the component of deformations transverse with composite layers sharply increases.

The recording of acoustic emission parameters, deformation fields and temperatures, resonant oscillation frequency during fatigue loading makes it possible to reveal in a complex the facts and moments of the appearance and development of fatigue damage in samples.

Keywords: polymer composite materials, layered carbon plastics, fatigue, fracture, digital image correlation, acoustic emission, infrared thermometry, experimental study.

Во многих отраслях техники в качестве конструкционного материала применяются полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе эпоксидного связующего, армированные углеродным волокном. Из слоистых углепластиков изготавливают, в частности, конструктивные элементы аэрокосмических изделий, авиационных двигателей, самолетов [1–3]. Для обеспечения надежности конструкций из углепластиков необходимо знать их прочностные характеристики. В частности, для изделий авиационной техники, часто работающих длительное время в условиях вибраций, необходимо понимание закономерностей усталостного разрушения, влияния на них конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов. Проблема усталостной прочности ПКМ осложняется тем, что изготовленные из одних и тех же материалов матрицы и волокон, но с разной объемной долей волокон, разными вариантами плетения и укладки, обладают разной усталостной прочностью [4–8].

Отличительной особенностью процессов усталостного разрушения слоистых углепластиков по сравнению с металлами является то, что повреждения в их структуре появляются уже на начальных этапах циклического нагружения [4]. На начальных стадиях появляются нарушения адгезии между волокном и матрицей, появляются микротрещины в матрице. Далее, по мере нагружения, появляются и растут макроскопические нарушения адгезии между слоями ламината – расслоения. На финальной стадии исчерпания ресурса может происходить разрыв армирующих волокон и потеря несущей способности материала [4].

Различные авторы отмечают, что все стадии накопления усталостных повреждений сопровождаются снижением жесткости ПКМ. Падение жесткости выражается, в частности, в снижении собственных частот колебаний образцов и элементов конструкций по мере усталостной наработки [9–15]. С учетом разнообразия структур композиционных материалов, механизмы их разрушения необходимо исследовать отдельно для слоистых [16–18], тканых с 2D- и 3D-плетением [19, 20–23] и армированных короткими случайно распределенными волокнами [24–27] материалов. В последние годы получили развитие методы исследования поврежденности композитных материалов с помощью компьютерной томографии [25, 28, 29]. Исследования с применением этого метода остаются в настоящее время уникальными.

В настоящей работе описан опыт применения комплексного экспериментального подхода к исследованию процессов усталостного разрушения слоистых углепластиков, включающий анализ вибрационных характеристик, акустической эмиссии, тепловых полей и полей деформаций.

Методика эксперимента

Объектом исследования являются образцы из слоистого конструкционного углепластика на основе равнопрочной углеродной ткани с эпоксидным связующим. Образцы в рабочей части имеют форму прямоугольного параллелепипеда с сечением 15×25 мм и длиной 220 мм. Укладка слоев разнонаправленная [45, 0, 0, 45], по толщине образца, количество слоев ламината – 116. На концах образцов выполнены трапециевидные расширения для крепления в оснастке.

Методика испытаний предполагала исследование процессов усталостного разрушения при двух вариантах нагружения: циклическом растяжении переменной силой F_D (рис. 1, а) и циклический изгиб переменной силой F_D на фоне статического растяжения силой F_S (рис. 1, б). В обоих случаях сила F_D изменяется по гармоническому закону с частотой f .

Схема испытательной установки и ее внешний вид представлены на рис. 2 [13–15]. Экспериментальная установка представляет собой высокочастотный электрорезонансный пульсатор AmslerZwickHFP 5100 с системой регистрации параметров испытаний.

Высокочастотный электрорезонансный пульсатор AmslerZwickHFP 5100 обеспечивает нагружение образца в режиме резонансных колебаний системы «образец – пульсатор». По мере накопления усталостных повреждений происходит падение жесткости образца. При этом пада-

ет резонансная частота колебаний [13–15]. Электрорезонансный пульсатор обеспечивает автоматическое поддержание резонанса и параметров силы F_D (среднего, максимального и минимального значения), а также регистрацию текущей резонансной частоты колебаний f , числа циклов нагружения N и параметров силы F_D .

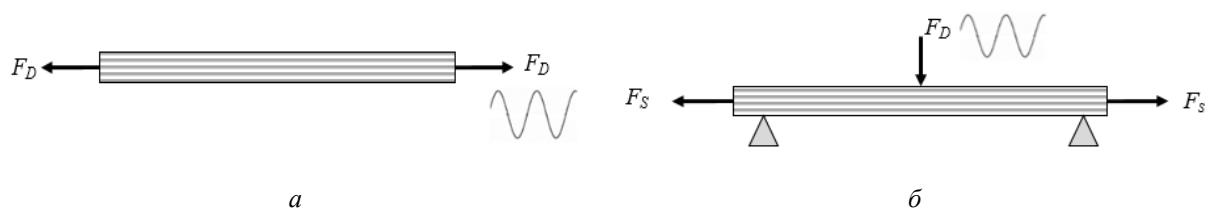


Рис. 1. Два варианта схемы нагружения образцов: *a* – циклическое растяжение силой F_D и *б* – циклический изгиб силой F_D на фоне статического растяжения силой F_S

В процессе усталостного нагружения образца велась непрерывная регистрация полей деформаций на его боковой поверхности. Для этого был использован метод корреляции цифровых изображений (Digital Image Correlation – DIC) [30, 31]. Перед нагружением на поверхности исследуемого образца с помощью белой и черной матовых красок наносится контрастное мелкодисперсное покрытие (спекл-картина). С помощью двух цифровых камер получают снимки «спекла» до и после деформации. Для реализации метода DIC была использована оптическая система Vic 3D HC с двумя высокоскоростными камерами PHOTRON FASTCAM SA5. В настоящей работе использовалась частота съемки 5000 кадров в секунду с разрешением 1024×1024 пикселей. При обработке результатов регистрации полей деформаций выбирались кадры, соответствующие моментам максимальной деформации образца. Разрешение по измерению деформации 50 мк . Дополнительно деформации в двух точках на поверхности образца контролировали с помощью тензорезисторов, сигнал с которых регистрируется и обрабатывается системой анализа данных SCADAS III.

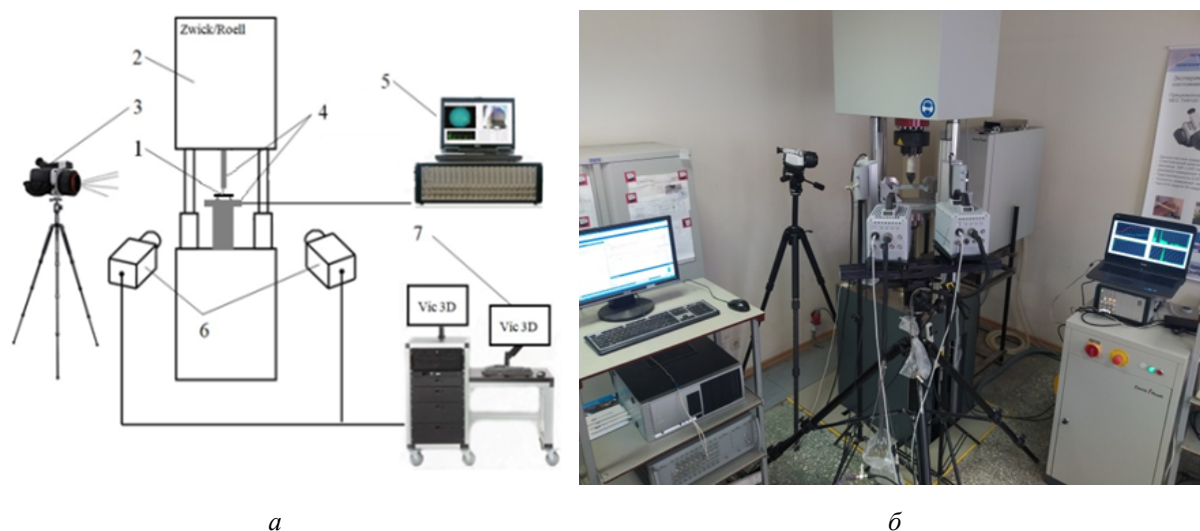


Рис. 2. Схема (*a*) и внешний вид (*б*) экспериментальной установки для исследования усталостного разрушения образцов образцов: 1 – исследуемый образец, 2 – высокочастотный электрорезонансный пульсатор Amsler ZwickHFP 5100, 3 – прецизионная инфракрасная камера NECTH9100WR ProNew, 4 – оснастка для установки образца, 5 – система акустической эмиссии AMSY-6, 6 – высокоскоростные видеокамеры Photron Fastcam SA5, 7 – система регистрации полей деформаций Vic 3D-HC

Появление и накопление усталостных повреждений при циклическом нагружении вызывает локальный саморазогрев образца в области повреждений. В связи с этим, в процессе на-

гружения проводилась регистрация поля температур на боковой поверхности исследуемого образца. Для этого использовалась прецизионная инфракрасная камера NEC TH9100 WR со спектральным диапазоном 8–14 мкм, чувствительностью 0,03 °С и пространственным разрешением 1,2 мрад.

Для регистрации процесса разрушения образцов использовалась многоканальная акустико-эмиссионная (АЭ) система AMSY-6. Сигналы акустической эмиссии, генерируемые при появлении повреждений, принимаются пьезокерамическими микрофонами АЕ204А с диапазоном измерения частот 180–700 кГц. Два микрофона были расположены на торцевых поверхностях образца в зоне захватов. В процессе нагружения образцов регистрировали количество событий АЭ и их энергетический выброс.

Во всех проведенных исследованиях поддерживались постоянными параметры нагрузки F_D («мягкое» нагружение); она изменялась по гармоническому закону с минимальным значением $F_{D\min}$ и максимальным $F_{D\max}$; асимметрия цикла нагружения $R = F_{D\min} / F_{D\max} = 0,1$.

Исследование проводилось при комнатной температуре.

Результаты и обсуждение

Циклическое растяжение. Первая группа образцов была исследована при схеме нагружения «растяжение – растяжение» (см. рис. 1, а). Образцы нагружались циклической растягивающей силой F_D , направленной вдоль слоёв армирующей ткани. Диапазон исследованных нагрузок $\sigma_{D\max} / \sigma_B = 0,05–0,1$ (σ_B – предел прочности образца на статический разрыв). Частота переменной нагрузки составляла $f = 55–57$ Гц. Образцы испытывались на базе 10^7 циклов.

В настоящем исследовании процесс разрушения контролировался визуально. Выявленные повреждения образцов представляют собой макроскопические трещины-расслоения. Они возникают, как правило, вблизи захватов и расположены в плоскости, параллельной оси образца и перпендикулярной его лицевой поверхности (рис. 3). По мере усталостной наработки они развиваются как в толщину образца, так и в направлении продольной оси.

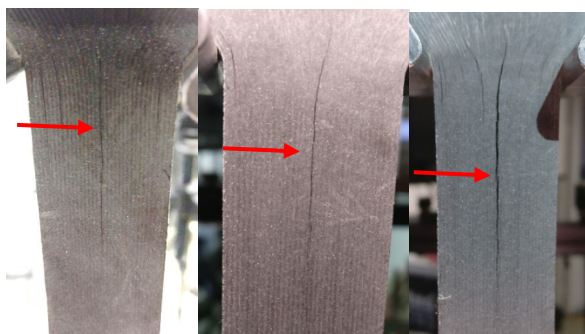


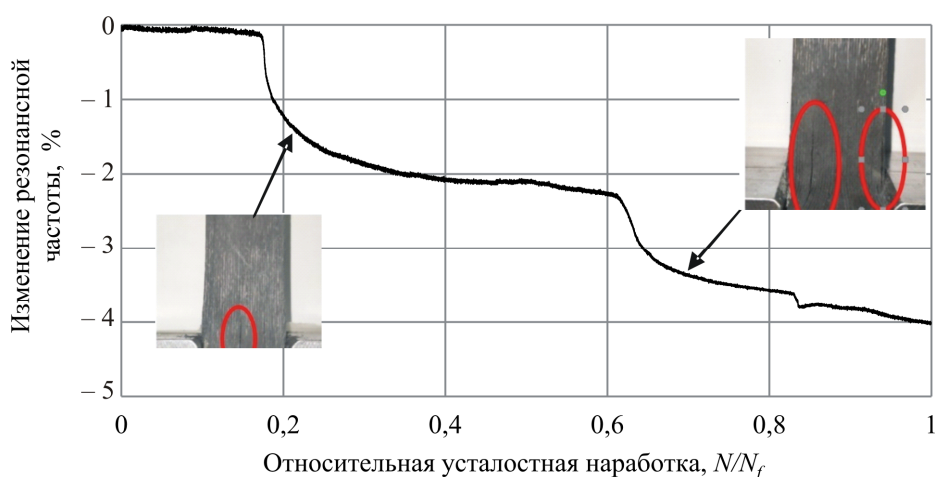
Рис. 3. Примеры расслоений в образцах после усталостных испытаний

По мере усталостной наработки и появления повреждений падает жесткость и резонансная частота колебаний системы «образец – пульсатор». На начальной стадии усталостного разрушения происходит накопление повреждений в связующем; при этом резонансная частота колебаний практически не изменяется. На следующей стадии разрушения в результате слияния повреждений в связующем в образце появляются межслойные макроскопические трещины – расслоения. При их образовании или резком прорастании происходит скачкообразное снижение резонансной частоты. На рис. 4, а показан пример зависимости резонансной частоты колебаний «образец – пульсатор» от относительной усталостной наработки N / N_f (N – текущее число циклов нагружения, N_f – число циклов до разрушения). При значениях относительной усталостной наработки 0,18–0,2 и 0,6–0,65 видны скачкообразные падения резонансной частоты,

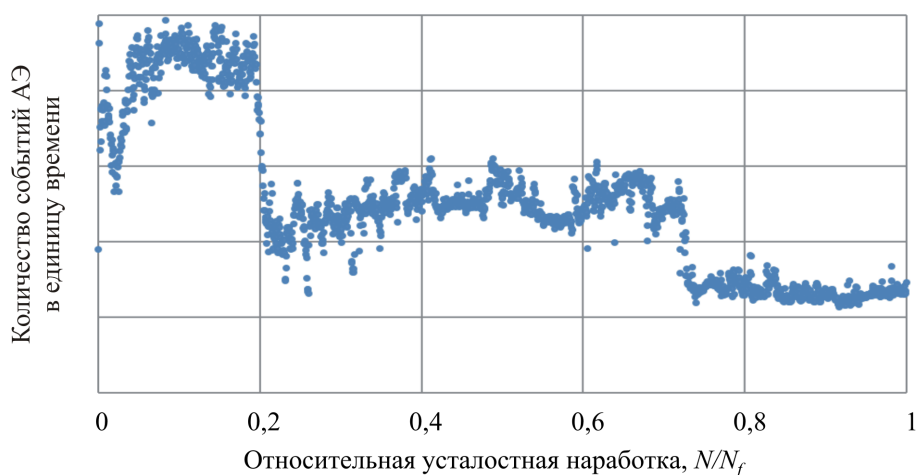
обусловленные появлением расслоений. Скачок частоты может составлять более 1 % от начального значения. Такой характер изменения жесткости образцов согласуется с классическими представлениями о стадийности усталостного разрушения слоистых ПКМ [4]. Скачкообразное падение резонансной частоты может служить индикатором появления трещин при усталостных испытаниях образцов.

Процесс усталостного разрушения образцов сопровождается генерацией акустических колебаний (акустической эмиссией, АЭ). В настоящем исследовании в процессе усталостных испытаний образцов проводилась регистрация параметров АЭ с целью оценки возможности использования параметров АЭ для выявления ранних стадий усталостного разрушения. В процессе испытаний образцов непрерывно регистрировали количество акустических событий в единицу времени и энергию событий АЭ.

На рис. 4, *б* показан пример зависимости количества зарегистрированных событий АЭ в единицу времени от относительной усталостной наработки N/N_f . Каждое скачкообразное изменение количества событий АЭ в единицу времени соответствует скачку резонансной частоты и образованию макроскопических расслоений в образце.



а



б

Рис. 4. Пример изменения резонансной частоты колебаний «образец – пульсатор» (*а*) и суммарного количества событий акустической эмиссии (*б*) по мере относительной усталостной наработки образца при циклическом растяжении

Поля деформаций на поверхности образцов в процессе испытаний определялись с целью нахождения наиболее нагруженных зон с локальными концентраторами напряжений, а также для контроля напряженно-деформированного состояния при нагружении. Использовался метод цифровой корреляции изображений, получаемых высокоскоростной съемкой. Перед началом усталостных испытаний каждого образца производилось его статическое нагружение до максимальной нагрузки, предусмотренной в цикле. При этом фиксировались поля деформаций ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , ϵ_{xy} (направление осей показано на рис. 5). Кроме того, поля деформаций регистрировались в процессе циклического нагружения и после остановки испытаний в ненагруженном состоянии с целью оценки уровня остаточных деформаций образца.

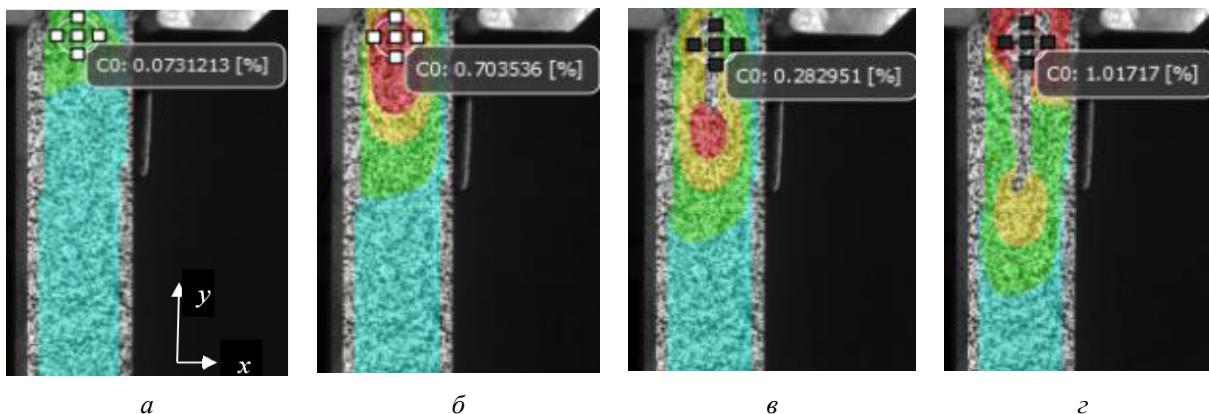


Рис. 5. Поля деформаций ϵ_{xx} , полученные методом корреляции цифровых изображений при наработке: $a - N / N_f = 0$; $б - N / N_f = 0,02$; $в - N / N_f = 0,13$; $г - N / N_f = 0,99$.

На рис. 5 приведен пример эволюции поля деформаций ϵ_{xx} в образце по мере увеличения циклической наработки. При статическом нагружении образца до начала циклических испытаний при максимальном напряжении цикла (рис. 5, *a*) в образце видна зона незначительных поперечных деформаций ϵ_{xx} вблизи захватов с левой стороны, вызванных зажатием образца в оснастке. По мере циклической наработки в этой зоне поперечная деформация растяжения ϵ_{xx} возрастает почти в 10 раз (рис. 5, *б*), что связано с появлением и раскрытием трещины. При дальнейшем увеличении наработки (см. рис. 5, *a*) происходит скачкообразное прорастание трещины, и зона деформаций растяжения смещается вместе с вершиной трещины (рис. 5, *в, г*). Таким образом, поперечная деформация ϵ_{xx} может служить индикатором появления и развития расслоений в образце.

Циклический изгиб. Вторая группа образцов была исследована при схеме циклического трехточечного изгиба силой F_D , направленной перпендикулярно слоям армирующей ткани, на фоне статического растяжения силой F_s , направленной вдоль слоёв (см. рис. 1, *б*).

Статическая продольная нагрузка на образец создается с помощью винтовой пары в оснастке и контролируется по тензорезистору, расположенному на нижней поверхности образца посередине между опорами. Испытания образцов проводили при одинаковых значениях осевой статической деформации по $1050\mu\epsilon$ и одинаковых значениях коэффициента асимметрии цикла нагружения силой F_D $R = 0,1$. Частота гармонической поперечной силы F_D составляла $f = 36$ Гц. Образцы испытывались на базе 10^6 циклов.

Выявленные повреждения образцов представляют собой макроскопические трещины-расслоения. Типичный пример трещин-расслоений представлен на рис. 6. Они возникают первоначально вблизи захватов и расположены в плоскости, параллельной оси образца и перпендикулярной его лицевой поверхности. По мере усталостной наработки расслоения распространяются в направлении продольной оси образца.

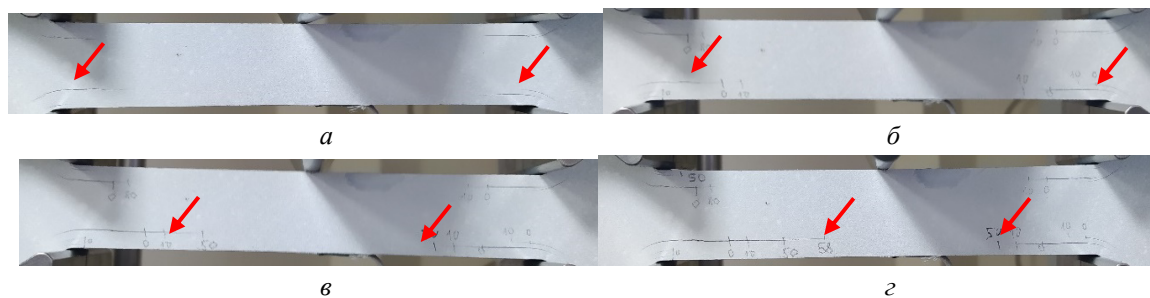


Рис. 6. Пример развития расслоений в образце по мере циклической наработки: *a* – после статического растяжения, без усталостной наработки; *б* – $N / N_f = 0,17$; *в* – $N / N_f = 0,85$; *г* – $N / N_f = 0,99$

На рис. 7 на одной временной шкале показан полученный для одного из образцов пример изменения резонансной частоты испытаний и параметров АЭ при их непрерывной регистрации в процессе усталостного нагружения. Как и в случае испытаний образцов на растяжение (см. рис. 4), зависимость резонансной частоты от относительной усталостной наработки имеет характерные участки скачкообразного падения при $N / N_f = 0,4$ и $N / N_f = 0,7$. Их наличие связано со сменой механизма разрушения: возникновением расслоений или их резким распространением.

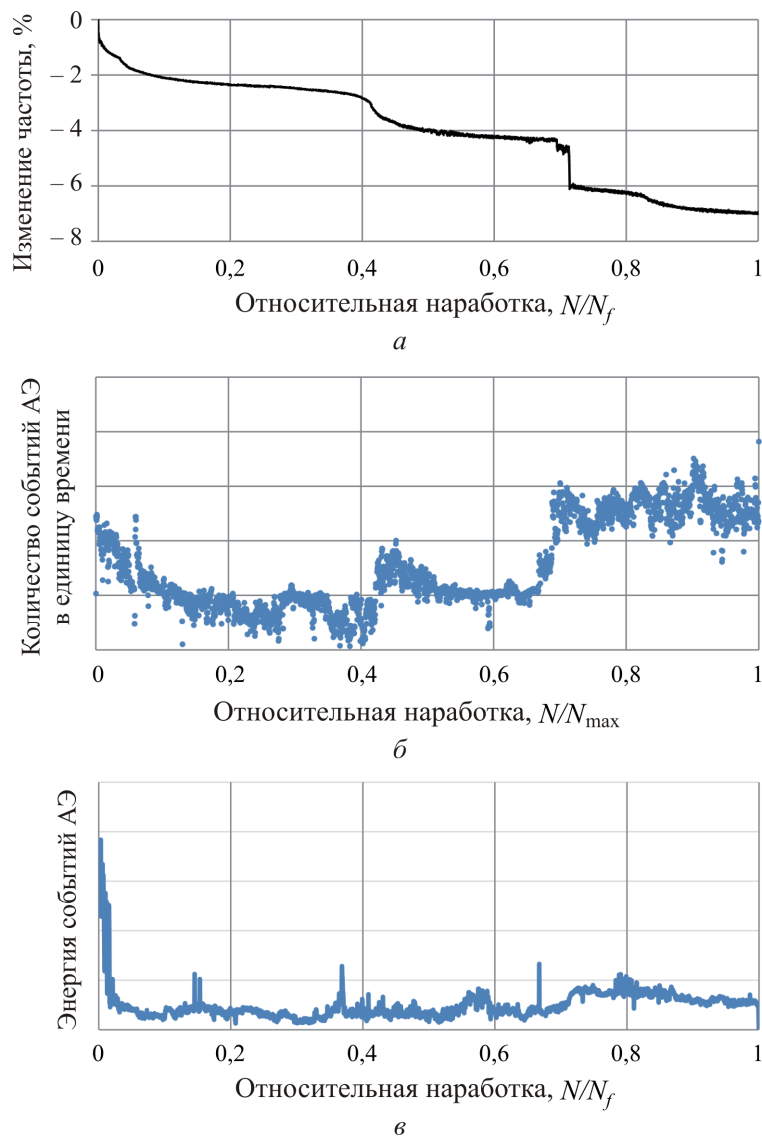


Рис. 7. Пример изменения резонансной частоты испытаний (*a*) и изменение параметров АЭ (*б*, *в*) по мере относительной усталостной наработки образца при циклическом изгибе

На графике, показывающем количество событий АЭ в единицу времени (рис. 7, б), также хорошо видно четыре характерных зоны. Зона от начала испытания до $N/N_f = 0,1$ соответствует, по-видимому, первичной приработке образца; количество событий АЭ в этой зоне плавно снижается. Далее следуют три зоны ($N/N_f = 0,1-0,4$; $N/N_f = 0,4-0,7$ и от $N/N_f = 0,7$ до конца испытания), на которых количество сигналов АЭ в единицу времени держится на примерно постоянном уровне и ступенчато возрастает при переходе к каждой последующей зоне.

На графике энергии событий АЭ (рис. 7, в) виден ряд высокоэнергетических событий при $N/N_f = 0,15$, $N/N_f = 0,35$, $N/N_f = 0,64$. Эти события соответствуют, по-видимому, процессам образования или резкого развития расслоений в материале. Они предшествуют каждому из перечисленных выше моментов скачкообразного изменения резонансной частоты и количества событий АЭ в единицу времени. Это является косвенным подтверждением того, что изменения параметров АЭ отражают появление или развитие макроскопических повреждений в образцах.

Косвенным признаком расслоения образца, как и в случае испытаний на циклическое растяжение (см. рис. 5), является его положительная деформация в поперечном направлении. На рис. 8 приведены полученные методом цифровой корреляции изображения поля деформаций того же образца, для которого на рис. 7 показаны параметры АЭ. Поля деформаций определяли на стадии статического нагружения продольной силой, а также на последующей стадии циклического нагружения при различных значениях усталостной наработки. Приведены поля нормальных деформаций ϵ_{yy} в направлении, перпендикулярном продольной оси образца. На стадии статического нагружения при $N/N_f = 0$ расслоение возникает в зоне А, о чем свидетельствует появление локальной области повышенной поперечной деформации $\epsilon_{yy} = 3,7\%$. При усталостной наработке $N/N_f = 0,16$ еще одна такая область с $\epsilon_{yy} = 5,1\%$ возникает в зоне В. Этому предшествует регистрация высокоэнергетического события АЭ (см. рис. 7, в). При наработке $N/N_f = 0,31$ поперечная деформация в зоне В увеличивается, что свидетельствует о развитии расслоений в этой зоне. При наработке $N/N_f = 0,64$ поперечная деформация в зоне В увеличивается до $\epsilon_{yy} = 6,7\%$, площадь этой локальной зоны поперечных деформаций расширяется, что говорит о дальнейшем развитии расслоения в ней. На заключительном этапе испытаний образца, при $N/N_f = 0,98$ заметно расширяется зона поперечных деформаций А, расслоение достигает середины образца.

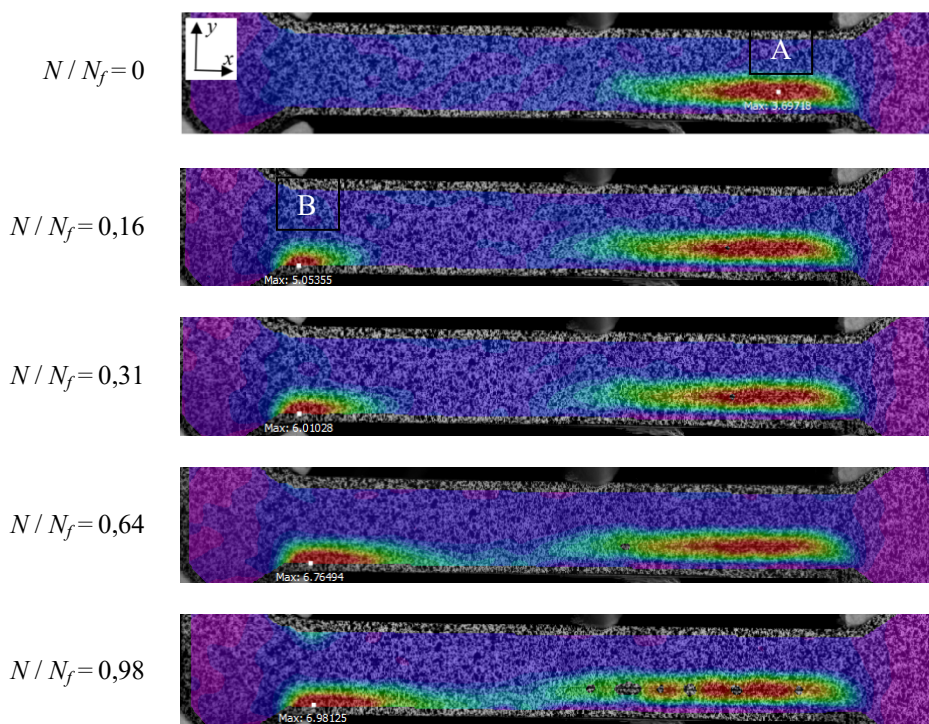


Рис. 8. Пример полей деформаций ϵ_{yy} , возникающих в образце в различные моменты нагружения при циклическом изгибе

В процессе циклического нагружения тепловое состояние образцов вследствие саморазогрева меняется. Локальное повышение температуры в некоторой зоне образца свидетельствует об интенсификации процесса накопления повреждений в этой зоне или появлении расслоений.

На рис. 9 показан полученный для одного из образцов пример термограмм при циклическом изгибе на разных значениях относительной усталостной наработки. Сразу после начала усталостного нагружения при $N/N_f = 0,003$ в областях 1 и 2 появляются локальные зоны разогрева. Нагрев в области 1 связан с контактным взаимодействием между образцом и клином. Нагрев в области 2 обусловлен, по-видимому, образованием дефекта еще в процессе статического нагружения продольной силой. Пятно в области T связано с наличием тензодатчика. Далее по мере усталостной наработки при $N/N_f = 0,02$ (см. рис. 9) локальная зона саморазогрева 2 расширяется, максимальная температура в этой зоне увеличивается с комнатной температуры до 33 °С. При относительной наработке $N/N_f = 0,16$ зона саморазогрева 2 становится шире, а максимальная температура в ней увеличивается до 43 °С. При дальнейшем нагружении при $N/N_f = 0,59$ появляется еще одна зона саморазогрева 3, что свидетельствует о появлении еще одного расслоения. Перед разрушением при $N/N_f = 0,98$ максимальная температура образца до 48,7 °С. Приведенные поля температур согласуются с приведенными выше данными о падении жесткости образца по мере циклической наработки. Таким образом, регистрация полей температуры позволяет выявлять появление трещин в процессе усталостного нагружения образцов из ПКМ и следить за их ростом.

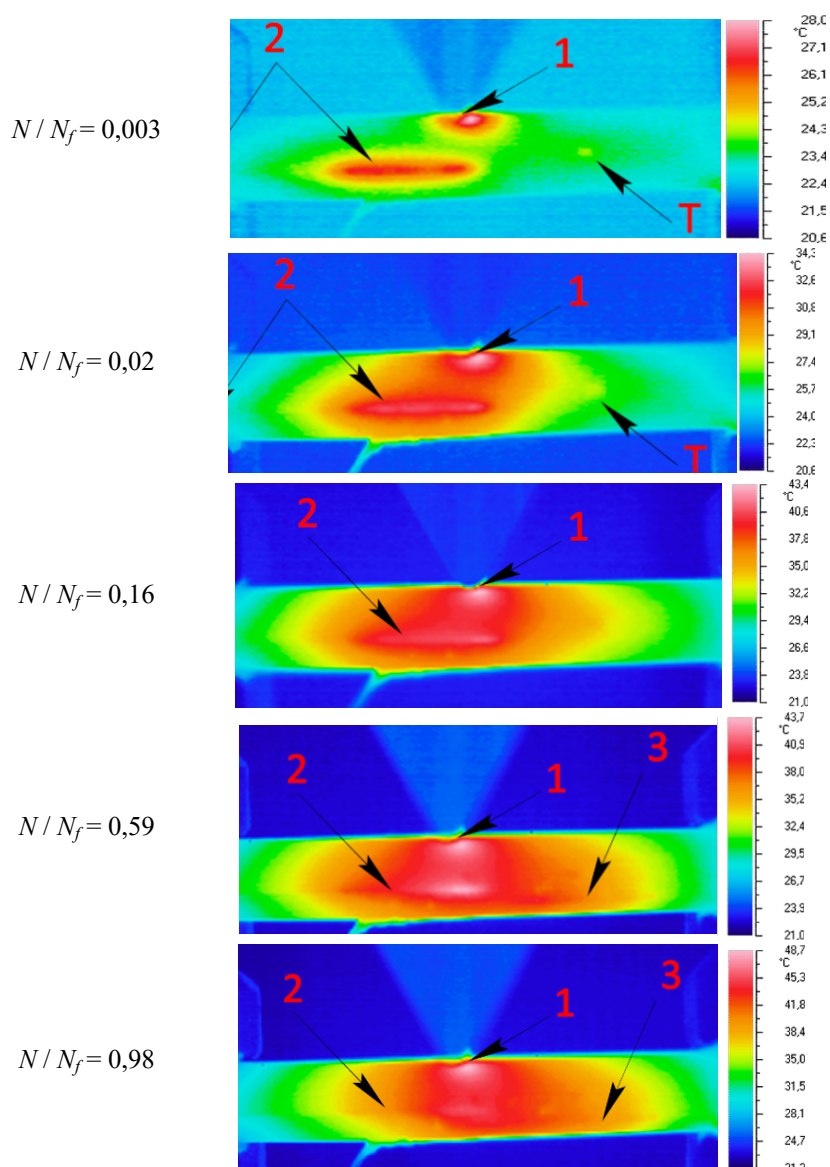


Рис. 9. Пример термограмм образца при различных значениях относительной усталостной наработки

Заключение

Проведено комплексное исследование закономерностей усталостного разрушения образцов из слоистого углепластика при двух схемах нагружения на электрорезонансном пульсаторе: циклическом растяжении и циклическом трехточечном изгибе на фоне предварительного статического растяжения. Наряду с параметрами нагружения в процессе усталостного нагружения образцов непрерывно регистрировали резонансную частоту колебаний образца, параметры акустической эмиссии, поля деформаций и температур на поверхности образца.

Основным механизмом разрушения слоистого углепластика при обеих исследованных схемах нагружения является появление и развитие расслоений.

Получены экспериментальные данные об изменении резонансной частоты колебаний образцов по мере усталостной наработки. Установлено, что при усталостном нагружении имеют место явления скачкообразного падения частоты колебаний и жесткости образца, обусловленные возникновением или ростом расслоений.

Получены экспериментальные данные о параметрах акустической эмиссии исследованных образцов в процессе усталостного нагружения: количества событий АЭ в единицу времени и энергии событий АЭ. Имеет место обусловленное появлением или резким прорастанием расслоений ступенчатое изменение количества событий АЭ, которое совпадает по времени с явлениями скачкообразного изменения резонансной частоты и появлением высокоэнергетических событий АЭ.

Методом цифровой корреляции изображений получены поля трех компонент тензора деформаций ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , ϵ_{xy} на поверхности исследованных образцов в процессе усталостного нагружения. В зонах появления расслоений резко возрастает поперечная по отношению к плоскости укладки слоев ламината компонента деформаций.

Методом инфракрасной термометрии получены поля температур исследованных образцов в процессе усталостного нагружения. В зонах усталостного разрушения возникают связанные с накоплением повреждений локальные области повышенного саморазогрева образцов.

Регистрация в процессе усталостного нагружения параметров АЭ, полей деформаций и температур, резонансной частоты колебаний позволяют в комплексе выявить факты и моменты появления и развития усталостных повреждений в образцах.

Рекомендуется использовать полученные в рамках данной работы экспериментальные данные и методику усталостных испытаний образцов при исследованиях закономерностей усталостного разрушения слоистых ПКМ и прогнозирования усталостного ресурса деталей из них.

Библиографический список

1. Келли А. Инженерный триумф углеволокон // Композиты и наноструктуры. – 2009. – № 1. – С. 38–49.
2. Иноземцев А.А., Нихамкин М.Ш., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. – М.: Машиностроение, 2008. – Т. 2. – 368 с.
3. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. – 2019. – № 7–8. – С. 54–58.
4. Каримбаев Т.Д. Оценка усталостной долговечности изделий из композиционных материалов // Авиационные двигатели. – 2020. – № 4 (9). – С. 75–93.
5. Стрижиус В.Е. Некоторые закономерности усталостного разрушения элементов композитных авиаконструкций // Композиты и наноструктуры. – 2016. – Т. 8, № 4. – С. 265–271.
6. Колобков А.С. Полимерные композиционные материалы для различных конструкций авиационной техники (обзор) // Труды ВИАМ. – 2020. – № 6–7 (89). – С. 38–44.
7. Kulkarni P.V., Sawant P.J., Kulkarni V.V. Fatigue life prediction and modal analysis of carbon fiber reinforced composites // Advances in Materials and Processing Technologies. – 2018. – Vol. 4, iss. 4. – P. 651–659.
8. The fatigue of carbon fibre reinforced plastics – a review / P. Alam, D. Mamalis, C. Robert [et al.] // Composites Part B. – 2019. – Vol. 166. – P. 555–579.

9. Abo-Elkhier M., Hamada A.A. El-Deen B. Prediction of fatigue life of glass fiber reinforced polyester composites using modal testing // *International Journal of Fatigue*. – 2014. – Vol. 69. – P. 28–35.
10. Experimental study on high-cycle fatigue behavior of GFRP-steel sleeve composite cross arms / J. Wang, N. Tan, S. Zhou [et al.] // *Advances in civil engineering*. – 2018. – Article ID 6346080. – 12 p.
11. Fatigue life evaluation for carbon/epoxy laminate composites under constant and variable block loading / P.N.B. Reis, J.A.M. Ferreira, J.D.M. Costa [et al.] // *Composites Science and Technology*. – 2009. – Vol. 69. – P. 154–160.
12. Нихамкин М.Ш., Соломонов Д.Г., Зильбершмидт В.В. Идентификация характеристик упругости композита по экспериментальным данным о модальных характеристиках образцов // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2019. – № 1. – С. 108–120.
13. Nikhamkin M.Sh., Solomonov D.G. Change of the elastic characteristics of a fiber-reinforced laminate as a result of progressive fatigue damage // *Solid State Phenomena*. – 2021. – Vol. 316. – P. 955–960.
14. Nikhamkin M.S., Solomonov D.G., Voronkov A.A. Experimental study of fatigue damage accumulation in laminated carbon reinforced fiber plastics // *Journal of Physics: Conference Series* 22. “XXII Winter School on Continuous Media Mechanics”, WSCMM 2021”. – 2021. – P. 012040.
15. Nikhamkin M.S., Solomonov D.G. Degradation of elastic characteristics of the CFRP used in the design of a gas turbine engine as a result of high-cycle fatigue damage // *Journal of Physics: Conference Series. International Conference on Aviation Motors, ICAM 2020*. – 2021. – P. 012033.
16. Ice vs. steel: Ballistic impact of woven carbon/epoxy composites. Part I – Deformation and damage behavior / L.A. Coles, A. Roy, N. Sazhenkov [et al.] // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2020. – Vol. 222. – 18 p.
17. Zweben C.H., Beaumont P. *Comprehensive Composite Materials* // Elsevier. – 2000. – Vol. 2. – P. 529–552.
18. Quasi-static and fatigue tensile behavior of a 3D rotary braided carbon/epoxy composite / V. Carvelli, J. Pazmino, S. Lomov, V. Bogdanovich [et al.] // *Journal of Composite Materials*. – 2013. – Vol. 47 (25). – P. 3195–3209.
19. Cluster analysis of acoustic emission signals for 2D and 3D woven carbon fiber/epoxy composites / Li, Li & Swolfs, Yentl & Straumit, Ilya [et al.] // *Journal of Composite Materials*. – 2016. – № 50. – P. 1921–1935.
20. A multiscale modeling methodology for damage progression in polymer-based composites / H. Lee, D. Veysset, J.P. Singer [et al.] // *12th International Conference on Fracture, ICF-12*. – 2009. – Vol. 6. – 7 p.
21. Fatigue and post-fatigue stress-strain analysis of a 5-harness satin weave carbon fibre reinforced composite / S. Daggumati, I. De Baere, W. Van Paepegem [et al.] // *Composites Science and Technology*. – 2013. – Vol. 74. – P. 20–27.
22. Influence of fibre architecture on impact and fatigue behaviour of flax fibre-based composites / F. Bensadoun, D. Depuydt, J. Baets [et al.] // *International Conference on Composite Materials, Montreal, Canada, 29 Jul – 03 Aug 2013*. – 2013. – 7 p.
23. Ever J. Barbero, Javier Cabrera Barbero. Determination of material properties for progressive damage analysis of carbon/epoxy laminates // *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. – 2019. – Vol. 26. – P. 938–947.
24. Damage development in open-hole composite specimens in fatigue. Part 1: Experimental investigation / O.J. Nixon-Pearson, S.R. Hallett [et al.] // *Composite Structures*. – 2013. – Vol. 106. – P. 882–889.
25. High-resolution and high-speed CT in industry and research SPIE / S. Zabler, C. Fella, A. Dietrich [et al.] // *Optical Engineering + Applications*. – 2012. – P. 850617.
26. Liang S., Gning P.B., Guillaumat L. Properties evolution of flax/epoxy composites under fatigue loading // *International Journal of Fatigue*. – 2014. – № 63. – P. 36–45.
27. Poisson’s ratio as a sensitive indicator of (fatigue) damage in fibre-reinforced plastics / W. van Paepegem, I. de Baere, E. Lamkanfi [et al.] // *Fatigue & fracture of engineering materials & structures*. – 2007. – Vol. 30 (4). – P. 269–276.
28. Garcea S.C., Wang Y., Withers P.J. X-ray computed tomography of polymer composites // *Composite Science and Technology*. – 2018. – Vol. 156. – P. 305–319.
29. Garcea S.C., Sinclair I., Spearing S.M. In situ synchrotron tomographic evaluation of the effect of toughening strategies on fatigue micromechanisms in carbon fibre reinforced polymers // *Composite Science and Technology*. – 2015. – Vol. 109. – P. 32–39.

30. Impact damage in woven carbon fibre/epoxy laminates: Analysis of damage and dynamic strain fields / L. Coles, A. Roy, L. Voronov [et al.] // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 199. – P. 2500–2505.

31. Application of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics / T.C. Chu, W.F. Ranson, M.A. Sutton [et al.] // *Exp. Mech.* – 1985. – № 25. – P. 232–244.

References

1. Kelly A. Inzhenernyy triumf uglevolokon. [Engineering triumph of carbon fibers]. *Composites and nanostructures*, 2009, No. 1, pp. 38-49.

2. Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.SH., Sandratskiy V.L. *Osnovy konstruirovaniya aviatsionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok. t.2* [Fundamentals of designing aircraft engines and power plants. v.2]. Moscow, Mashinostroyeniye, 2008, 368 p.

3. Kablov E.N. VIAM: new generation materials for PD-14 [VIAM: materialy novogo pokoleniya dlya PD-14]. *Krylya Rodiny*, 2019, No. 7–8, pp. 54–58.

4. Karimbaev T.D. Otsenka ustalostnoy dolgovechnosti izdeliy iz kompozitsionnykh materialov [Assessment of fatigue life of products from composite materials]. *Aircraft engines*, no.4 (9), 2020, pp. 75-93.

5. Strizhius V.E. Nekotoryye zakonomernosti ustalostnogo razrusheniya elementov kompozitnykh aviakonstruktsiy [Some patterns of fatigue failure of elements of composite aircraft structures]. *Composites and nanostructures*, V.8 (2016), No. 4, pp. 265-271.

6. Kolobkov A.S. Polimernyye kompozitsionnyye materialy dlya razlichnykh konstruktsiy aviatsionnoy tekhniki (obzor) [Polymer composite materials for various designs of aviation equipment (review)]. *Trudy VIAM*, no. 6-7 (89), 2020, pp. 38-44

7. Kulkarni P.V., Sawant P.J., Kulkarni V.V. Fatigue life prediction and modal analysis of carbon fiber reinforced composites. *Advances in Materials and Processing Technologies*, Volume 4, 2018, Issue 4, pp. 651-659.

8. Alam P, Mamalis D, Robert C., et. al. The fatigue of carbon fibre reinforced plastics - a review. *Composites Part B*, Vol.166 (2019), pp. 555-579.

9. Abo-Elkhier M., Hamada A.A. El-Deen B. Prediction of fatigue life of glass fiber reinforced polyester composites using modal testing. *International Journal of Fatigue*, no. 69 (2014), pp. 28–35.

10. Wang J., Tan N., Zhou S., et. al. Experimental study on high-cycle fatigue behavior of GFRP-steel sleeve composite cross arms. *Advances in civil engineering*, Vol. 2018, article ID 6346080, 12 p.

11. Reis P.N.B., Ferreira J.A.M., Costa J.D.M., et. al. Fatigue life evaluation for carbon/epoxy laminate composites under constant and variable block loading. *Composites Science and Technology*, Vol. 69 (2009), pp.154-160.

12. Nikhamkin M.Sh., Solomonov D.G., Silberschmidt V.V. Identification of elastic parameters of composite using experimental data on modal characteristics of samples. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2019, no. 1, pp. 108-120.

13. Nikhamkin M.Sh., Solomonov D.G. Change of the elastic characteristics of a fiber-reinforced laminate as a result of progressive fatigue damage. *Solid State Phenomena*, 2021, Vol. 316, pp. 955-960.

14. Nikhamkin M.S., Solomonov D.G., Voronkov A.A. Experimental study of fatigue damage accumulation in laminated carbon reinforced fiber plastics. *Journal of Physics: Conference Series* 22. "XXII Winter School on Continuous Media Mechanics, WSCMM 2021", 2021, P. 012040.

15. Nikhamkin M.S., Solomonov D.G. Degradation of elastic characteristics of the CFRP used in the design of a gas turbine engine as a result of high-cycle fatigue damage // *Journal of Physics: Conference Series*. "International Conference on Aviation Motors, ICAM 2020", 2021, P. 012033

16. L.A. Coles, A. Roy, N. Sazhenkov, et. al. Ice vs. steel: Ballistic impact of woven carbon/epoxy composites. Part I – Deformation and damage behaviour. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, Vol. 222, 18 p.

17. Carl H. Zweben, Peter Beaumont. *Comprehensive Composite Materials*. Elsevier, 2000, Volume 2, pp. 529-552.

18. Carvelli, V., Pazmino, J., Lomov, S. et. al. (2013). Quasi-static and fatigue tensile behavior of a 3D rotary braided carbon/epoxy composite. *Journal of Composite Materials*, no. 47 (25), pp. 3195–3209.

19. Li, Li & Swolfs, Yentl & Straumit, Ilya, et. al. (2016). Cluster analysis of acoustic emission signals for 2D and 3D woven carbon fiber/epoxy composites. *Journal of Composite Materials*, no. 50, pp. 1921-1935.

20. H.. Lee, D. Veysset, J.P. Singer, et. al. A multiscale modeling methodology for damage progression in polymer-based composites. *12th International Conference on Fracture, ICF-12*, Vol.6 (2009), 7 p.

21. Daggumati S., Baere I. De, Paeppegem W. Van, et. al. Fatigue and post-fatigue stress-strain analysis of a 5-harness satin weave carbon fibre reinforced composite. *Composites Science and Technology*, 2013, Vol. 74, pp. 20-27.
22. Bensadoun, F., Depuydt, D., Baets, J., et. al. (2013). Influence of fibre architecture on impact and fatigue behaviour of flax fibre-based composites. *International Conference on Composite Materials*, Montreal, Canada, 29 Jul 2013-03 Aug 2013, 7 p.
23. Ever J. Barbero, Javier Cabrera Barbero, Determination of material properties for progressive damage analysis of carbon/epoxy laminates. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Volume 26, 2019, pp. 938-947.
24. Nixon-Pearson OJ, Hallett SR, Withers PJ, et. al. Damage development in open-hole composite specimens in fatigue. Part 1: Experimental investigation. *Composite Structures*, 2013; Volume 106, pp. 882–889.
25. S. Zabler, C. Fella, A. Dietrich, et. al. High-resolution and high-speed CT in industry and research SPIE. *Optical Engineering + Applications* (2012), P. 850617
26. Liang S., Gning P.B., Guillaumat L. Properties evolution of flax/epoxy composites under fatigue loading. *International Journal of Fatigue*, Elsevier, 2014, no. 63, pp.36-45.
27. VanPaeppegem W., De Baere I., Lamkanfi E., et. al. Poisson's ratio as a sensitive indicator of (fatigue) damage in fibre-reinforced plastics. *Fatigue&fracture of engineering materials&structures*, Vol. 30 (4), 2007, pp.269-276.
28. Garcea SC, Wang Y, Withers PJ. X-ray computed tomography of polymer composites. *Composite Science and Technology*, 2018, Volume 156, pp.305-319.
29. Garcea SC, Sinclair I, Spearing SM. In situ synchrotron tomographic evaluation of the effect of toughening strategies on fatigue micromechanisms in carbon fibre reinforced polymers. *Composite Science and Technology*, 2015, Volume 109, pp. 32-39.
30. L. Coles, A. Roy, L. Voronov, et. al. Impact damage in woven carbon fibre/epoxy laminates: Analysis of damage and dynamic strain fields. *Procedia Engineering*, 2017, Vol. 199, pp. 2500-2505.
31. Chu T.C., Ranson W.F., Sutton M.A., et. al. Application of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. *Exp. Mech.* 1985; no. 25, pp. 232-244.

Сведения об авторах

Балакирев Александр Андреевич (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры «Авиационные двигатели», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29, e-mail: 1st.leona@gmail.com).

Гладкий Иван Леонидович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, начальник отдела прочности силовых схем и перспективных методов анализа, ОДК-Авиадвигатель (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 93, e-mail: gladky@avid.ru).

Мехоношин Григорий Викторович (Пермь, Россия) – инженер кафедры «Авиационные двигатели», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29, e-mail: mehonoshingrigori@rambler.ru).

Куракин Антон Дмитриевич (Пермь, Россия) – инженер кафедры «Авиационные двигатели», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29, e-mail: kurakin_ad@mail.ru).

Нихамкин Михаил Шмерович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Авиационные двигатели», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29, e-mail: Nikhamkin@mail.ru).

Саженов Николай Алексеевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиационные двигатели», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29, e-mail: sazhenkov_na@mail.ru).

Семенов Сергей Валерьевич (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры «Авиационные двигатели», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29, e-mail: sergey.semyonov@mail.ru).

Соломонов Данил Глебович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Авиационные двигатели», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29, e-mail: solomonov1198@yandex.ru).

About the authors

Aleksandr A. Balakirev (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Aircraft Engines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: 1st.leonao@gmail.com).

Ivan L. Gladkiy (Perm, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Head of the Department of Strength of Power Circuits and Advanced Methods of Analysis, UEC-Aviadvigatel (93, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: gladky@avid.ru).

Grigoriy V. Mekhonoshin (Perm, Russian Federation) – Engineer, Department of Aircraft Engines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: mehonoshingrigo@rambler.ru).

Anton D. Kurakin (Perm, Russian Federation) – Engineer, Department of Aircraft Engines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: kurakin_ad@mail.ru).

Mikhail Sh. Nikhamkin (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Aviation Engines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: Nikhamkin@mail.ru).

Nikolay A. Sazhenkov (Perm, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Department of Aviation Engines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: sazhenkov_na@mail.ru).

Sergey V. Semenov (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Aircraft Engines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: sergey.semyonov@mail.ru).

Danil G. Solomonov (Perm, Russian Federation) – PhD Student, Department of Aviation Engines, Perm National Research Polytechnic University (93, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: solomonov1198@yandex.ru).

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 21-79-30041).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Поступила: 18.02.2023

Одобрена: 21.02.2023

Принята к публикации: 28.02.2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Экспериментальное исследование закономерностей усталостного разрушения толстых стержней из слоистого углепластика / А.А. Балакирев, И.Л. Гладкий, Г.В. Мехоношин, А.Д. Куракин, М.Ш. Нихамкин, Н.А. Саженов, С.В. Семенов, Д.Г. Соломонов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2023. – № 72. – С. 111–124. DOI: 10.15593/2224-9982/2023.72.09

Please cite this article in English as: Balakirev A.A., Gladkiy I.L., Mekhonoshin G.V., Kurakin A.D., Nikhamkin M.Sh., Sazhenkov N.A., Semenov S.V., Solomonov D.G. Experimental study of the patterns of fatigue failure of thick rods made of laminated carbon fiber. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2023, no. 72, pp. 111-124. DOI: 10.15593/2224-9982/2023.72.09