

Лобанов Д.С., Вильдеман В.Э., Спаскова Е.М., Чихачев А.И. Экспериментальное исследование влияния дефектов на прочность композитных панелей методами корреляции цифровых изображений и инфракрасной термографии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2015. – № 4. – С. 159–170. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.4.10

Lobanov D.S., Wildemann V.E., Spaskova E. M., Chikhachev A.I. Experimental investigation of the defects influence on the composites sandwich panels strength with use digital image correlation and infrared thermography methods. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2015. No. 4. Pp. 159-170. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.4.10



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 4, 2015

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2015.4.10

УДК 620.1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ НА ПРОЧНОСТЬ КОМПОЗИТНЫХ ПАНЕЛЕЙ МЕТОДАМИ КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ

Д.С. Лобанов, В.Э. Вильдеман, Е.М. Спаскова, А.И. Чихачев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 8 ноября 2015 г.
Принята: 17 ноября 2015 г.
Опубликована: 25 декабря 2015 г.

Ключевые слова:

экспериментальная механика, композиционные материалы, методики испытаний, метод корреляции цифровых изображений, инфракрасная тепловизионная система, оценка работоспособности, панели ЗПК, локальный ремонт волокнистых композитов, циклические испытания, испытания на растяжение

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена экспериментальному исследованию влияния дефектов на остаточную прочность конструкций из композиционных материалов, а также возможности применения локальных ремонтно-восстановительных операций.

Объектами исследования являются конструктивно-подобные элементы, образцы звукопоглощающих панелей (панели ЗПК) с искусственно нанесенным дефектом типа сквозного пробоа, после локального ремонта. Образцы-панели изготовлены из серийных материалов по серийной технологии из препрега стеклотекстолита.

Исследования проводились на универсальной электромеханической системе Instron 5982 и сервогидравлической Instron 8801. Для анализа напряженно-деформированного состояния деформируемых элементов в работе используется бесконтактная трехмерная цифровая оптическая система Vic-3D, математический аппарат которой основан на методе корреляции цифровых изображений (DIC). Для контроля внутренней геометрии образца и оценки возможных дефектов осуществлялась тепловая дефектоскопия с помощью инфракрасной тепловизионной системы FLIR SC7000. Предложены методики совместного использования испытательных и измерительных систем при проведении статических и циклических испытаний.

Механические испытания для сравнения проведены на образцах панелей ЗПК при статическом растяжении и при статическом растяжении с предварительным циклическим нагружением с регистрацией полей деформаций и термограмм. С целью анализа механизмов разрушения образца-панели в работе представлены диаграммы, построенные в процессе испытаний на статическое растяжение. По полученным экспериментальным данным с видеосистемы исследована эволюция неоднородных полей продольных и поперечных деформаций на поверхности образцов-панелей с залеченным дефектом при статическом нагружении, а также при циклических испытаниях. С помощью инфракрасной тепловизионной системы регистрировались внутренняя структура, процессы развития дефектов, а также распределение температур на поверхности испытываемого образца.

© ПНИПУ

© Лобанов Дмитрий Сергеевич – младший научный сотрудник, e-mail: cem.lobanov@gmail.com
Вильдеман Валерий Эрвинович – доктор физико-математических наук, профессор, e-mail: wildemann@pstu.ru
Спаскова Елена Михайловна – аспирант, младший научный сотрудник, e-mail: cem.spaskova@mail.ru
Чихачев Александр Игоревич – аспирант, ведущий инженер, e-mail: stfw@mail.ru

Dmitry S. Lobanov – Junior Researcher, e-mail: cem.lobanov@gmail.com
Valery E. Wildemann – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, e-mail: wildemann@pstu.ru
Elena M. Spaskova – Doctoral Student, Junior Researcher, e-mail: cem.spaskova@mail.ru
Aleksandr I. Chikhachev – Doctoral Student, Lead Engineer, e-mail: stfw@mail.ru

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF DEFECTS INFLUENCE ON COMPOSITES SANDWICH PANELS STRENGTH USING DIGITAL IMAGE CORRELATION AND INFRARED THERMOGRAPHY METHODS

D.S. Lobanov, V.E. Wildemann, E.M. Spaskova, A.I. Chikhachev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 8 November 2015
Accepted: 17 November 2015
Published: 25 December 2015

Keywords:

experimental mechanics, composite materials, techniques of tests, digital image correlation, infrared thermographic system, evaluation of working capacity, sandwich panels, local repair of fibrous composites, fatigue tests, tension tests

ABSTRACT

The article is devoted to the experimental investigation of the defects influence on the residual strength of composites structure, as well as the possibility of using local repair operations.

The objects of research are structurally similar elements of acoustical sandwich panels after a local repair of defects, such as through breakdown. The specimens were produced by serial technology from a fiberglass prepreg.

Research was carried out using a universal electromechanical system Instron 5982 and servo-hydraulic system Instron 8801. For the analysis of the stress-strain state of the deformable elements the authors used the non-contact three-dimensional digital optical system Vic-3D, the mathematical apparatus which is based on the method of digital image correlation (DIC). To control the internal geometry of the specimen and assess the possible defect inspection infrared thermal imaging system FLIR SC7000 was used. The techniques of joint use of testing and measuring systems under static and cyclic tests were offered.

For comparison, the repaired sandwich panel specimens were tested in tension and in tension under a preliminary cyclic loading with the registration of the deformation fields and thermal images. Their deformation and fracture mechanisms are analyzed, and their loading diagrams are obtained. The experimental data was obtained from the Vic3d system study of the evolution inhomogeneous fields of axial and transverse deformation on the surface of repaired sandwich panels under static loading and cyclic tests. By using infrared thermal imaging system internal structure, processes of the defects development and the temperature distribution on the surface of the test specimen were detected.

© PNRPU

Введение

Использование композитов позволяет уменьшить массу конструкции при сохранении или улучшении ее механических характеристик. Композитные материалы широко используются в авиационной и космической технике в деталях, подвергающихся переменным нагрузкам [1]. В ходе эксплуатации конструкций из композитов неизбежно возникают различные дефекты, при этом актуальными становятся исследования возможности локального ремонта конструкций в полевых условиях.

Объектами исследования являются конструктивно-подобные элементы, образцы звукопоглощающих панелей (панели ЗПК) с искусственно нанесенным дефектом типа сквозного пробоя, после локального ремонта. Сквозной пробой оболочки характеризуется повреждением всех армирующих слоев детали, возникшим в результате эксплуатации. Принцип локального ремонта заключается в удалении и послойном замещении поврежденных слоев материала на ремонтные с соблюдением направления основы, а также добавлением двух дополнительных слоев поверх ремонтных с обеих сторон образца. Поврежденный наполнитель не восстанавливается, а заполняется специальным составом. Более подробно о технологии ремонта и методиках механических испытаний панелей ЗПК изложено в работах [2–5].

Исследования, связанные с циклическим нагружением, прогнозированием остаточного ресурса, зарождением и распространением усталостных трещин, являются актуальными. Метод инфракрасной термографии широко применяется при проведении механических

ких исследований с целью получения детальной информации о закономерностях накопления энергии в процессе деформирования металлов [6–10]. Ранее исследования с помощью термографии осуществлялись на однородных материалах, но с развитием технологий и появлением современного оборудования этот метод был применен также к композитам [11–13].

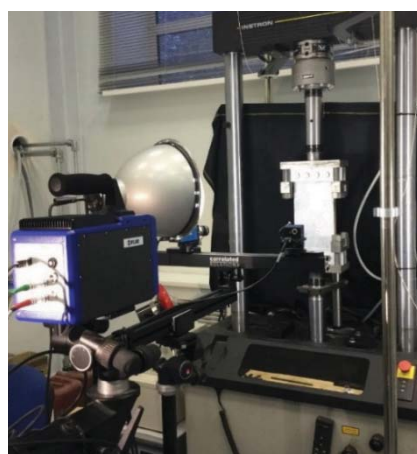
Более подробные исследования поведения композитов при циклическом нагружении с помощью традиционных методов и подходов являются недостаточными. Для исследования дефектов, трещин, отслоений наиболее часто применяются на практике такие методы, как ультразвуковая дефектоскопия, рентген, термография, акустическая эмиссия и оптический метод корреляции цифровых изображений. Перспективным направлением экспериментальной механики является комбинированное использование вышеперечисленных методов. В работах [14–18] показана возможность совместного использования акустической эмиссии, инфракрасной тепловизионной и бесконтактной оптической системы анализа полей деформаций при различных видах испытаний.

1. Методики экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводились в Центре экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета. Программа исследований включала в себя проведение механических испытаний на растяжение образцов-панелей размером 150×350 мм по ранее предложенным методикам [3, 4, 19, 20] при статическом и циклическом нагружении с использованием бесконтактной оптической видеосистемы Vic-3D и инфракрасной тепловизионной системы FLIR для контроля внутренней структуры образца, включая ремонтную зону (рис. 1). Дефект расположен в центральной части образца-панели. Для проведения исследований был выбран наиболее сложный для реализации ремонта дефект – сквозной пробой конструкции. Размер дефекта выбран из расчета, что длина дефекта равнялась половине ширины образца-панели ($l = 70$ мм). Для снижения концентрации напряжений на краях дефекта выполнен радиус $R = 7,5$ мм.



а



б

Рис. 1. Образцы-панели при испытаниях в электромеханической системе Instron 5982 при статическом растяжении (*а*) и в сервогидравлической системе Instron 8801 при циклических испытаниях (*б*)

Статические испытания проводились на универсальной электромеханической испытательной системе Instron 5982. Данная установка предназначена для квазистатических испытаний при растяжении, сжатии, изгибе с нагрузкой до 100 кН и скоростью нагружения от 0,001 до 500 мм/мин; более полное описание и технические характеристики приведены в работе [5, 21]. Подготовка испытаний заключалась в настройке параметров испытательного и измерительного оборудования при помощи специализированного программного обеспечения, синхронизации испытательной машины с видеосистемой и тепловизором, подготовке и установке образца.

Были заданы следующие параметры испытаний: скорость перемещения подвижной траверсы при растяжении 5 мм/мин; скорость съемки видеосистемой – 15 кадров в секунду; основные параметры корреляционной обработки: локальная область (подмножество) 59×59 пикселей, шаг 4 пикселя (subset 59, step 4); частота съемки инфракрасной тепловизионной системы 100 Гц.

Метод корреляции цифровых изображений (Digital Image Correlation – DIC) – это эффективный бесконтактный метод измерения деформаций на поверхности исследуемых объектов путем сравнения цифровых фотографий, снятых в процессе нагружения [22]. Первоначально осуществляется построение полей перемещений, затем следует вычисление компонент деформации. С помощью метода DIC можно анализировать изменение полей деформаций по контрастному рельефу образца, а также оценить степень деформации, момент и место ее локализации на макроуровне. Для анализа полей перемещений методом DIC требуется предварительная подготовка поверхности исследуемых объектов [22–24], в связи с чем на поверхность образца нанесено контрастное мелкодисперсное покрытие, далее образец устанавливался в специальную оснастку для испытаний (см. рис. 1).

Перед испытанием для контроля внутренней структуры образца и залеченного дефекта осуществлялась тепловая дефектоскопия: производился нагрев испытываемого образца с помощью лампы накаливания мощностью 150 Вт, продолжительность нагрева составила 30 с, нагрев осуществлялся на расстоянии 0,15 м. На рис. 2 приведены термограммы образца до и после нагрева в ненагруженном состоянии. Для контроля температуры был построен график распределения температур по выбранным линиям, проходящим через геометрический центр на поверхности образца (рис. 2, б) после нагрева в момент выключения лампы накаливания (рис. 2, в), максимальная температура на поверхности образца не превышает 40 °С. Такой режим кратковременного нагрева выбран с учетом того, чтобы повышенная температура не оказывала влияния на механические свойства клеевого слоя в зоне ремонта. Приведенные в работе [21] экспериментальные данные также косвенно свидетельствуют о том, что кратковременное повышение температуры до 40 °С не оказывает влияния на механические свойства стеклопластиков и, в частности, клеевого слоя.

Циклические испытания проводились на сервогидравлической испытательной системе Instron 8801. Данная система ориентирована на проведение статических испытаний на растяжение, сжатие и изгиб с максимальной нагрузкой 100 кН, усталостных испытаний с различной формой волны с частотой до 30 Гц, испытаний с произвольно заданным законом кинематического, силового или смешанного режима нагружения. Параметры циклических испытаний были выбраны исходя из норм коэффициента запаса прочности для авиационных композитов 2–2,5. За номинальные значения были приняты данные, полученные при испытаниях образцов-панелей без дефектов, представленные в работе [2].

При реализации программы циклических испытаний использовался знакопеременный несимметричный цикл силового нагружения со следующими параметрами: коэффициент асимметрии $R = -0,25$; амплитуда цикла $N_a = 25$ кН; форма волны в виде синуса; частота – 0,25 Гц; количество циклов $n = 200$. При этом минимальные значения по нагрузке составляли 10 кН, максимальные – 40 кН.

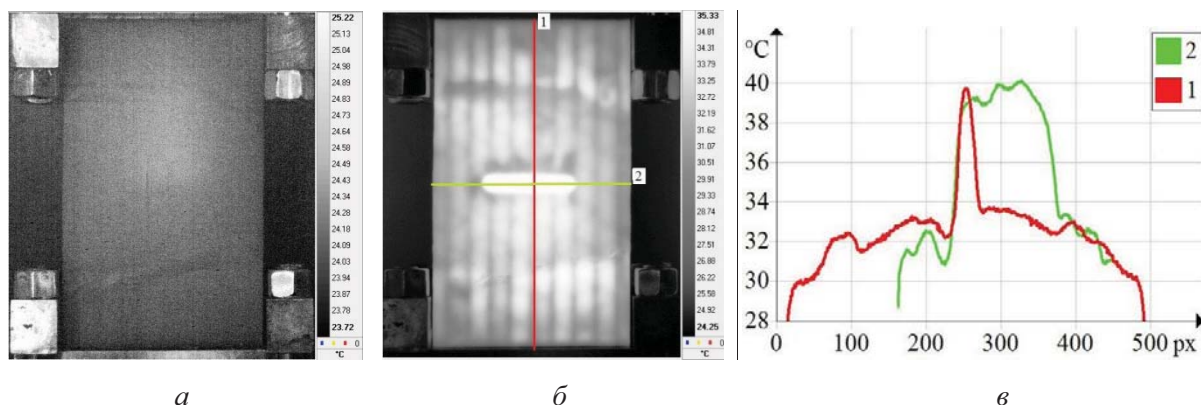


Рис. 2. Термограммы образца-панели с залеченным дефектом до (а) и после (б) нагрева и график распределения температур по выбранным линиям на поверхности образца после нагрева (в)

Испытания проводились в два этапа, каждый по 100 циклов. На первом этапе после каждых 10 циклов производилась остановка в пике максимума для регистрации полей деформаций и температур с целью анализа зависимости развития локальных повреждений и дефектов от количества циклов нагружения.

На втором этапе, а также на каждом 10-м цикле производилась остановка в пике максимума, далее производился аналогичный по режиму, приведенному выше, нагрев зоны ремонта образца-панели и регистрация внутренней структуры.

По окончании программы циклических испытаний образец-панель статически нагружался до разрушения.

2. Результаты испытаний

При испытании на статическое растяжение были построены диаграмма нагружения (рис. 3), поля поперечных и продольных деформаций до отрыва ремонтного слоя в момент первичного разрушения (точка 2, рис. 3), так как видеосистема позволяет получать поля деформаций на поверхности исследуемого объекта и соответствующие им термограммы (рис. 4).

Диаграмма нагружения построена по данным видеосистемы с использованием виртуального экстензометра [3, 24], при этом учитывались только перемещения в рабочей зоне образца.

На участке кривой нагружения 1–2 (см. рис. 3) картины полей деформаций и термограммы идентичны и соответствуют рис. 4, а, по достижении точки 2 на кривой произошло первичное разрушение, которое сопровождалось треском и характеризовалось локальным отслоением зоны ремонта (рис. 4, б). Далее на участке 2–3 (см. рис. 3) происходило отслоение зоны ремонта по всей ширине образца, что отчетливо видно на термограмме (рис. 4, в), разрушение клеевого соединения силовых оболочек с трубчатым наполнителем и последующая за этим локальная потеря устойчивости силовой оболочки.

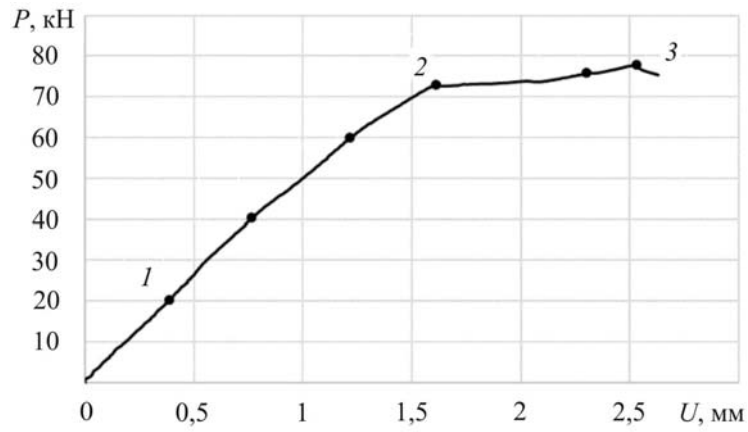


Рис. 3. Диаграмма нагружения образца-панели при растяжении

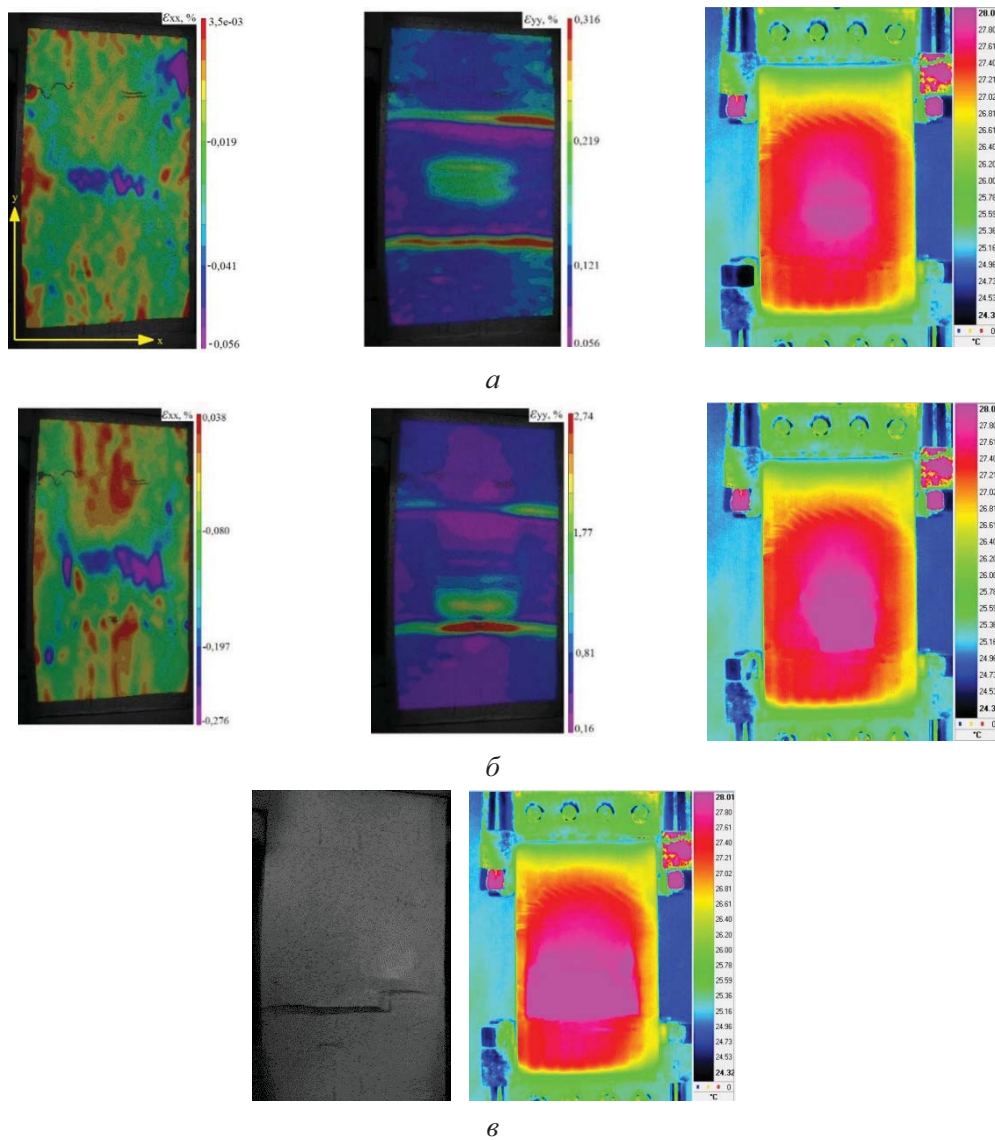


Рис. 4. Поля деформаций ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , и термограммы на поверхности образца в ходе испытания на статическое растяжение (а, б); внешний вид и термограмма в момент разрушения (в): а – соответствует точке 1 на диаграмме; б – точке 2; в – точке 3 (см. рис. 3)

Также наблюдалось нарушение целостности контрастного мелкодисперсного покрытия, что привело к невозможности дальнейшего построения полей деформаций. На рис. 4, в, приведена фотография образца в момент, соответствующий максимальной нагрузке 78 кН на диаграмме (см. рис. 3, точка 3). Далее произошел динамичный долом образца до полного разрушения. Снижение несущей способности образца-панели с зоной ремонта дефекта относительно образца-панели без дефекта [2] составило примерно 20 %.

Циклические испытания проводились в соответствии с описанной выше программой испытаний, при этом следует отметить, что на первом этапе (первые 100 циклов) развития в зонах концентраторов деформаций не наблюдалось. Распределения полей продольных деформаций и температур имели схожий вид при прохождении контрольных точек регистрации. Поля деформаций и термограммы, соответствующие 50, 80 и 100 циклам нагружения, представлены на рис. 5 ($n = 50$, $n = 80$, $n = 100$).

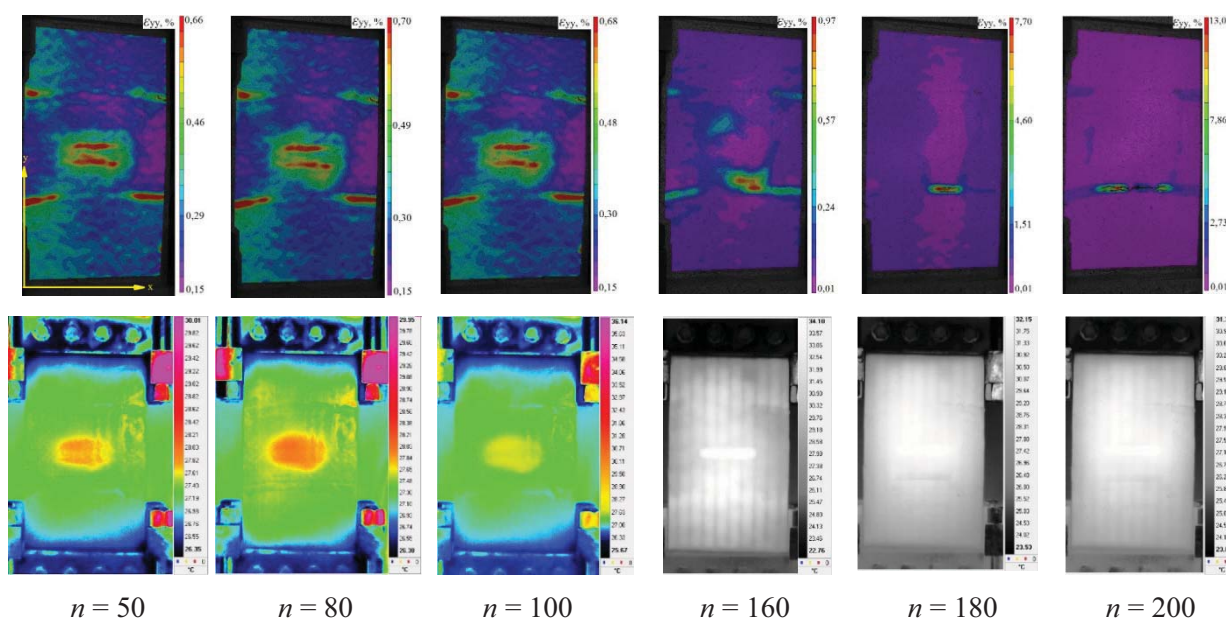


Рис. 5. Эволюция полей продольных деформаций (вверху) и соответствующие им термограммы (внизу) в зависимости от числа пройденных циклов нагружения

На втором этапе (вторые 100 циклов) до 160-го цикла наблюдалась аналогичная ситуация. Далее циклические нагружения стали сопровождаться характерным треском, после чего на последующих контрольных точках регистрации фиксировалась трещина в центральной части образца по зоне ремонта, что соответственно наблюдалось на распределениях полей продольных деформаций и термограммах и отчетливо видно на рис. 5 при $n = 180$ и $n = 200$. По результатам регистрации 20 контрольных точек циклических испытаний были построены эпюры распределения продольных деформаций по ширине испытываемого образца по линии возникновения отслоения нижней зоны ремонта, расположенной на 40 мм ниже геометрического центра образца (рис. 6). На рис. 6 вынесены эпюры, соответствующие полям деформаций (см. рис. 5), по которым также можно судить о том, на каком этапе циклических испытаний вследствие разрушения клеящего слоя и последующего отслоения возникла трещина по краю зоны ремонта.

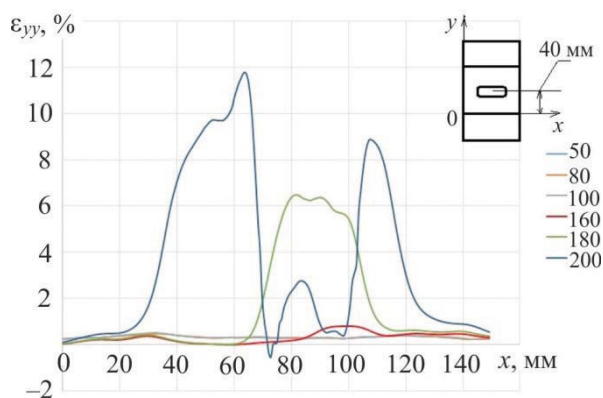


Рис. 6. Эпюры распределения продольной деформации ε_{yy} по линии нижней зоны ремонта на всей ширине образца-панели во время циклических испытаний, соответствующие контрольным точкам регистрации по прохождению 50, 80, 100, 160, 180 и 200 циклов нагружения

После предварительных циклических воздействий образец-панель был испытан на статическое растяжение. Диаграмма нагружения построена аналогичным способом – по данным видеосистемы (рис. 7).

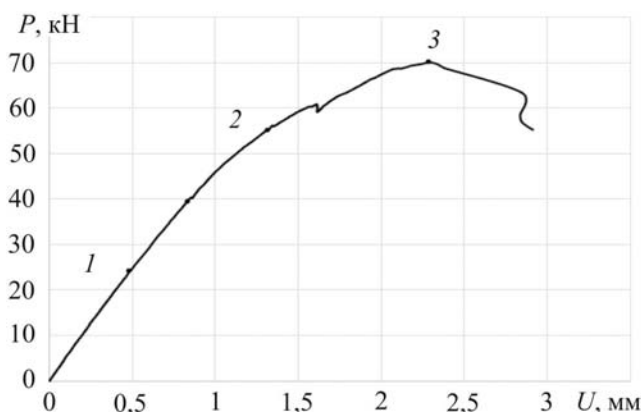


Рис. 7. Диаграмма нагружения образца-панели при растяжении после предварительных циклических воздействий

В ходе нагружения образца-панели визуально отмечалось развитие трещины – отслоения по краю зоны ремонта. На рис. 8 приведены поля поперечных и продольных деформаций и температур, соответствующие отмеченным на диаграмме нагружения точкам. Анализируя участки 1–2 и 2–3 на диаграмме (см. рис. 7), можно сделать вывод о постепенном росте трещины. Точка 3 соответствует максимальной нагрузке 70 кН, далее происходил динамический долом.

Показано, что несущая способность образца с нанесенным дефектом на 30 % ниже, чем образца без дефекта [2]. Циклические нагружения по описанным режимам привели к дополнительному снижению несущей способности на 10 %.

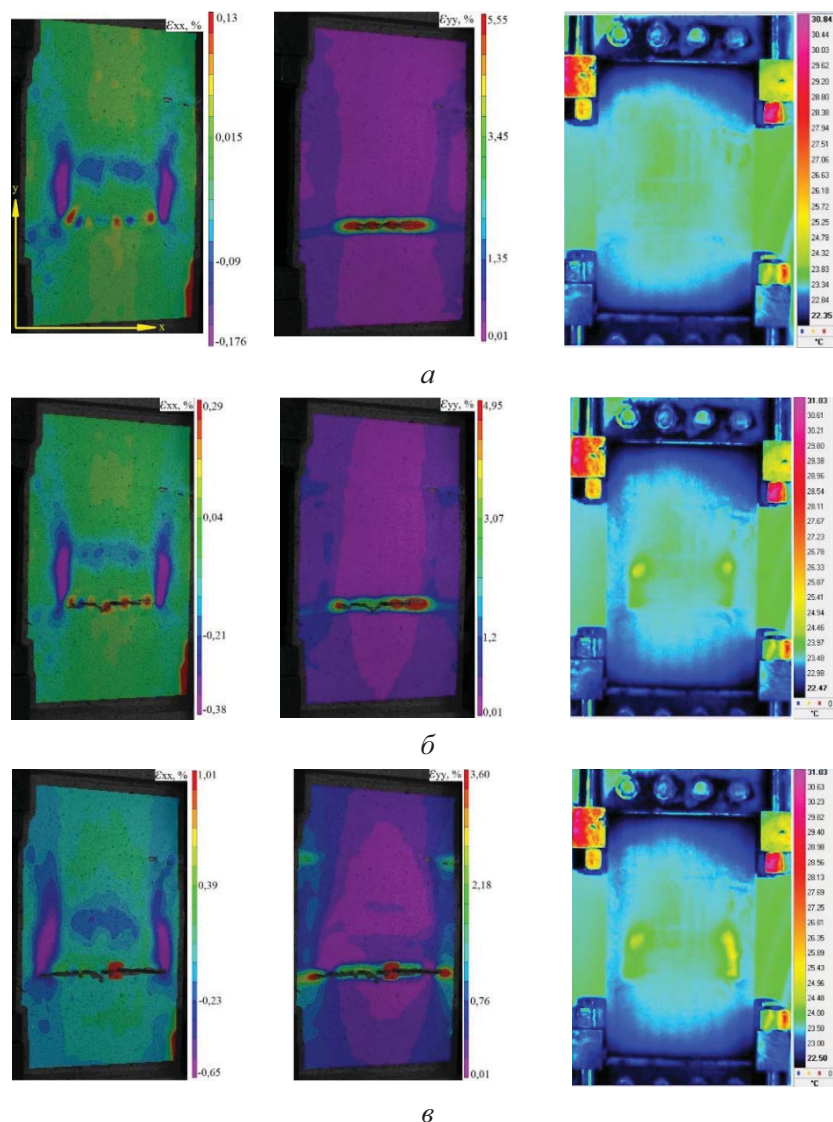


Рис. 8. Поля деформаций ϵ_{xx} , ϵ_{yy} и термограммы на поверхности образца в ходе испытания на статическое растяжение после предварительных циклических нагружений: *а* – соответствует точке 1; *б* – точке 2; *в* – точке 3 на диаграмме (см. рис. 7)

Выводы

Предложенная методика исследования влияния дефектов на остаточную прочность элементов конструкций из композитов на основе совместного использования систем регистраций полей деформаций и температур позволяет получать данные о процессах развития внешних и внутренних дефектов. В частности, она может быть использована для оценки эффективности ремонтно-восстановительных операций, а также для подбора оптимальной рецептуры клеящего слоя.

По результатам испытаний зафиксировано дополнительное снижение несущей способности панелей ЗПК после предварительных циклических воздействий. Следовательно, для эффективной оценки ремонтно-восстановительных операций конструкций из композитов целесообразно учитывать не только результаты испытаний на статическое растяжение, но и предварительные циклические воздействия в рабочих диапазонах нагружения.

Следует отметить необходимость проведения дополнительных испытаний для оценки влияния предварительных циклических воздействий, статистического разброса, а также размера допустимого дефекта и, соответственно, площади зоны ремонта.

Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при поддержке Российского научного фонда (проект № 15-19-00243).

Библиографический список

1. Технологии и задачи механики композиционных материалов для создания лопатки спрямляющего аппарата авиационного двигателя / А.Н. Аношкин, В.Ю. Зуйко, Г.С. Шипунов, А.А. Третьяков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2014. – № 4. – С. 5–44.

2. Оценка эффективности ремонта в конструкциях из полимерных волокнистых композиционных материалов / А.Н. Аношкин, В.Э. Вильдеман, Д.С. Лобанов, А.И. Чихачев // Механика композитных материалов – 2014. – № 3. – С. 441–450.

3. Вильдеман В.Э., Третьякова Т.В., Лобанов Д.С. Учет жесткости нагружающей системы при испытании полунатурных образцов крупноячеистого композиционного материала // Вестник Пермского государственного технического университета. Механика. – 2012. – № 2. – С. 34–49.

4. Зуйко В.Ю., Лобанов Д.С., Аношкин А.Н. Методики определения предела прочности полунатурных образцов-панелей из композиционных материалов при статических испытаниях на растяжение, сжатие и сдвиг // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2012. – № 2. – С. 99–111.

5. Экспериментальное исследование влияния внешних воздействующих факторов и эксплуатационных загрязнений на работоспособность полимерных волокнистых композиционных материалов / Д.С. Лобанов, В.Э. Вильдеман, А.Д. Бабин, М.А. Гринев // Механика композитных материалов. – 2015. – Т. 51, № 1. – С. 97–108.

6. Theoretical analysis, infrared and structural investigation of energy dissipation in metals under quasi-static and cyclic loading / O. Plekhov, N. Saintier, T. Palin-Luc, S. Uvarov, O. Naimark // Materials Science and Engineering A. – 2007. – Vol. 462. – No. 1. – P. 367–370.

7. Fatigue crack initiation detection by an infrared thermography method / D. Wagner, N. Ranc, C. Bathias, P.C. Paris // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. – 2010. – Vol. 33. – Iss. 1. – P. 12–21.

8. Плехов О.А. Экспериментальное исследование термодинамики пластического деформирования методом инфракрасной термографии // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81, № 2. – С. 143–146.

9. La Rosa G., Risitano A. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components // International Journal of Fatigue. – 2000. – Vol. 22. – Iss. 1. – P. 65–73.

10. Rapid determination of the fatigue curve by the thermographic method / G. Fargione, A. Geraci, G. La Rosa, A. Risitano // International Journal of Fatigue. – 2002. – Vol. 24. – Iss. 1. – P. 11–19.

11. Emery T.R., Dulieu-Barton J.M., Thermoelastic Stress Analysis of damage mechanisms in composite materials, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2010. – Vol. 41. – P. 1729–1742.

12. Libonati F., Vergani L., Damage assessment of composite materials by means of thermographic analyses // Composites Part B: Engineering. – 2013. – Vol. 50. – P. 82–90.

13. Montesano J., Fawaz Z., Bougherara H. Use of infrared thermography to investigate the fatigue behavior of a carbon fiber reinforced polymer composite // Composite Structures. – 2013. – Vol. 97. – P. 76–83.

14. Исследование деформации и разрушения по данным акустической эмиссии, корреляции цифровых изображений и тензометрии / С.В. Панин, А.В. Бяков, П.С. Любутин, О.В. Башков, В.В. Гренке, И.В. Шакиров, С.А. Хижняк // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2011. – Т. 77, № 9. – С. 50–59.

15. Многомасштабный метод анализа деформации металлических сплава и углерод-углеродных композиционных материалов по данным тензометрии, картирования деформации на поверхности и акустоэмиссии / В.Е. Панин, С.В. Панин, А.В. Бяков, М.В. Бурков, П.С. Любутин // Контроль. Диагностика. – 2011. – № 11. – С. 56–62.

16. Dattoma, V., Giancane, S. Evaluation of energy of fatigue damage into GFRC through digital image correlation and thermography // *Composites Part B: Engineering*. – 2013. – Vol. 47. – P. 283–289.

17. Comparison of infrared and 3D digital image correlation techniques applied for mechanical testing of materials / L. Krstulović-Opara, M. Surjak, M. Vesenjak, Z. Tonković, J. Kodvanj, Ž. Domazet // *Infrared Physics and Technology*. – 2015. – Vol. 73. – P. 166–174.

18. Wildemann V.E., Spaskova E.V., Shilova A.I. Research of the Damage and Failure Processes of Composite Materials Based on Acoustic Emission Monitoring and Method of Digital Image Correlation // *Solid State Phenomena*. – 2016. – Vol. 243. – P. 163–170.

19. Панин В.Ф., Гладков Ю.А. Конструкции с наполнителем: справочник. – М.: Машиностроение, 1991. – 272 с.

20. Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. – М.: Химия, 1981. – 272 с.

21. Research of the effectiveness of mechanical testing methods with analysis of features of destructions and temperature effects / A.V. Babushkin, D.S. Lobanov, A.V. Kozlova, I.D. Morev // *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2013. – Vol. 24. – P. 89–95.

22. Sutton M.A., Orteu J.-J., Schreier H. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. – USA, Columbia, University of South Carolina, SC, 2009. – 364 p.

23. Третьякова Т.В. Особенности использования программного обеспечения Vic-3D, реализующего метод корреляции цифровых изображений, в приложении к исследованию полей неупругих деформаций // *Вычислительная механика сплошных сред*. – 2014. – Т. 7, № 2. – С. 162–171.

24. Нихамкин М.Ш., Воронов Л.В., Болотов Б.П. Экспериментальное определение полей динамических деформаций в металлических и композитных пластинах при ударе // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2015. – № 2. – С. 103–115. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.2.06.

References

1. Anoshkin A.N., Zuiko V.Yu., Shipunov G.S., Tretyakov A.A. Technologies and problems of composite materials mechanics for production of outlet guide vane for aircraft jet engine. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2014, no. 4, pp. 5-44.

2. Anoshkin A.N., Vil'deman V.E., Lobanov D.S., Chikhachev A.I. Evaluation of repair efficiency in structures made of fibrous polymer composite materials. *Mechanics of Composite Materials*, 2014, vol. 50, no. 3, pp. 311-316.

3. Vildeman V.E., Tretyakova T.V., Lobanov D.S. Uchet zhestkosti nagruzhaiushchei sistemy pri ispytanii polunaturnykh obraztsov krupnoiacheistogo kompozitsionnogo materiala [Accounting of loading system stiffness in tests on scaled-down wide-meshed composite specimens]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2012, no. 2, pp. 34-49.

4. Zuyko V.Y., Lobanov D.S., Anoshkin A.N. Metodiki opredeleniia predela prochnosti polunaturnykh obraztsov-panelei iz kompozitsionnykh materialov pri staticheskikh ispytaniyakh na rastiazhenie, szhatie i sdvig [Technique of experimental determination ultimate strength composite materials sandwich-panel specimens of under static tests by tensile, compression and shear]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2012, no. 2, pp. 99-111.

5. Lobanov D.S., Vildeman V.E., Babin A.D., and Grinev M.A. Experimental research into the effect of external actions and polluting environments on the serviceability of fiber-reinforced polymer composite materials. *Mechanics of Composite Materials*, 2015, vol. 51, no. 1, pp. 69-76.

6. Plekhov O., Saintier N., Palin-Luc T., Uvarov S., Naimark O. Theoretical analysis, infared and structural investigation of energy dissipation in metals under quasi-static and cyclic loading. *Materials Science and Engineering A*, 2007, vol. 462, no. 1, pp. 367-370.

7. Wagner D, Ranc N., Bathias C. Paris P.C. Fatigue crack initiation detection by an infrared thermography method. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2010, vol. 33, iss. 1, pp. 12-21.

8. Plekhov O.A. Eksperimental'noe issledovanie termodinamiki plasticheskogo deformirovaniia metodom infrakrasnoi termografii [Experimental study of thermodynamics of plastic deformation by infrared thermography]. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2011, vol. 56, no. 2, pp. 301-304.

9. La Rosa G., Risitano A. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components. *International Journal of Fatigue*, 2000, vol. 22, iss. 1, pp. 65-73.

10. Fargione G., Geraci A., La Rosa G., Risitano A. Rapid determination of the fatigue curve by the thermographic method. *International Journal of Fatigue*, 2002, vol. 24, iss. 1, pp. 11-19.

11. Emery T.R., Dulieu-Barton J.M. Thermoelastic Stress Analysis of damage mechanisms in composite materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2010, vol. 41, pp. 1729-1742.

12. Libonati F., Vergani L. Damage assessment of composite materials by means of thermographic analyses. *Composites Part B: Engineering*, 2013, vol. 50, pp. 82-90.

13. Montesano J., Fawaz Z., Bougherara H. Use of infrared thermography to investigate the fatigue behavior of a carbon fiber reinforced polymer composite. *Composite Structures*, 2013, vol. 97, pp. 76-83.

14. Panin S.V., Biakov A.V., Liubutin P.S., Bashkov O.V., Grenke V.V., Shakirov I.V., Khizhniak S.A. Issledovanie deformatsii i razrusheniia po dannym akusticheskoi emissii, korreliatsii tsifrovyykh izobrazhenii i tenzometrii [Study of Deformation and Fracture Using Data of Acoustic Emission, Correlation of Digital Images and Strain-Gauging]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2011, vol. 77, no. 9, pp. 50-59.

15. Panin V.E., Panin S.V., Biakov A.V., Burkov M.V., Liubutin P.S. Mnogomasshtabnyi metod analiza deformatsii metallicheskiykh splava i uglerod-uglerodnykh kompozitsionnykh materialov po dannym tenzometrii, kartirovaniia deformatsii na poverkhnosti i akustoemissii [Multiscale Technique for Strain Analysis of Metal Based Alloys and Carbon-Carbon Composite Materials by Strain Gauging, Surface Strain Mapping and Acoustic Emission]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2011, no. 11, pp. 56-62.

16. Dattoma V., Giancane S. Evaluation of energy of fatigue damage into GFRC through digital image correlation and thermography. *Composites Part B: Engineering*, 2013, vol. 47, pp. 283-289.

17. Krstulović-Opara L., Surjak M., Vesenjajk M., Tonković Z., Kodvanj J., Domazet Ž. Comparison of infrared and 3D digital image correlation techniques applied for mechanical testing of materials. *Infrared Physics and Technology*, 2015, vol. 73, pp. 166-174.

18. Wildemann V.E., Spaskova E.V., Shilova A.I. Research of the Damage and Failure Processes of Composite Materials Based on Acoustic Emission Monitoring and Method of Digital Image Correlation. *Solid State Phenomena*, 2016, vol. 243, pp. 163-170.

19. Panin V.F., Gladkov Iu.A. Konstruktsii s zapolnitelem: Spravochnik [Designs with filler Handbook]. Moscow: Mashinostroenie, 1991. 272p.

20. Tarnopol'skii Iu.M., Kintsis T.Ia. Metody staticheskikh ispytaniy armirovannykh plastikov [Methods for static testing of the reinforced plastics]. Moscow: Khimiya, 1981. 272 p.

21. Babushkin A.V., Lobanov D.S., Kozlova A.V., Morev I.D. Research of the effectiveness of mechanical testing methods with analysis of features of destructions and temperature effects. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2013, vol. 24, pp. 89-95

22. Sutton M.A., J.-J.Orteu, H.Schreier. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. University of South Carolina, Columbia, SC, USA, 2009. 364 p.

23. Tret'iakova T.V. Osobennosti ispol'zovaniia programmnogo obespecheniia Vic-3D, realizuiushchego metod korreliatsii tsifrovyykh izobrazhenii, v prilozhenii k issledovaniyu polei neuprugikh deformatsii [Singularities in using Vic-3D™ Digital Image Correlation software and its application to the study of inelastic strain fields]. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred*, 2014, vol. 7, no. 2, pp. 162-171.

24. Nikhamkin M.Sh., Voronov L.V., Bolotov B.P. Experimental finding of dynamic deformation fields in metal and composite plates under impact. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2015, no. 2, pp. 103-115. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.2.06.