

УДК 620.17

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-62-66

А.В. Ильичев¹, А.Е. Раскутин¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАТОРА НАПРЯЖЕНИЙ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМАЦИОННОЕ СОСТОЯНИЕ УГЛЕПЛАСТИКА МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Представлены исследования, характеризующие влияние концентратора напряжений (в виде заполненного и открытого отверстия) на деформационное поле образцов из углепластика, выполненные оптическим методом корреляции цифровых изображений. В процессе исследования выявлена локальная область напряженно-деформационного состояния, иницируемая концентратором. Сопоставлены значения полей деформаций при заполненном и открытом отверстии.

Ключевые слова: метод корреляции цифровых изображений, концентратор напряжений, пластическая деформация, углепластик, композиционный материал.

Researches of influence of the concentrator of tension (in the form of the filled and open hole) on deformation field of samples carbon composites are provided by optical method of correlation of digital images. In the course of research the local area intense the deformed condition, initiated by the concentrator has been revealed. Values of fields of deformations are compared at the filled and open hole.

Keywords: method of correlation of digital images, concentrator of tension, plastic strain, carbon composites, composite material.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

Развитие номенклатуры современных материалов требует все больше новых технических и методологических подходов для определения комплекса деформационных и прочностных характеристик [1, 2]. Исследования данных характеристик в области механики разрушения традиционно производятся с применением тензоизмерительных приборов и экстензометров на их базе, голографической интерферометрии и метода муаровых полос. В настоящее время стали широко применяться бесконтактные средства измерения – оптические датчики деформации, из которых наиболее распространены лазерные и видеоэкстензометры. К оптическим средствам измерения относится и метод корреляции цифровых изображений (Digital Image Correlation – DIC). Принцип его работы основан на анализе цифровых изображений и нахождении коэффициента корреляции, который определяется по смещению точек спекл-структуры, предварительно нанесенных на образец [3]. Область распознавания должна быть контрастной, изотропной и нерегулярной. Поверхность образца должна быть однородной, черного или белого цвета. Далее на образцы наносятся черные метки (точки) на белый фон или белые на черный фон. Данная система позволяет определять поля деформации объекта исследования вплоть до разрушения, выделять и измерять любые участки цифровыми экстензометрами и тензодатчиками (виртуальные датчики, которые

можно выбирать и назначать на любом участке непосредственно в программе обработки скоррелированных изображений) [4–6].

Материалы и методы

Одними из наиболее опасных видов соединений для материалов являются болтовые и заклепочные. С применением ПКМ в конструкции воздушных судов доля таких соединений заметно уменьшилась, но не исчезла совсем. При предельных видах нагружения максимальная локализация напряженно-деформационного состояния происходит в зоне отверстия.

При интенсивных пластических деформациях заметно изменяется геометрия отверстия, происходит его овализация и смятие. В заполненном состоянии заклепка (стержень или болт) давит на стенки отверстия, сопротивляясь его овализации, тем самым передавая дополнительное напряжение на образец. Насколько критично такое влияние заполнителя в отверстии можно определить с применением средств измерения деформационных характеристик [7–10]. Наиболее полную картину деформационного поля материала (при предельной интенсивности напряжений) можно получить с применением системы корреляции цифровых изображений.

Результаты

В данной работе проводились исследования характера влияния концентратора напряжения на

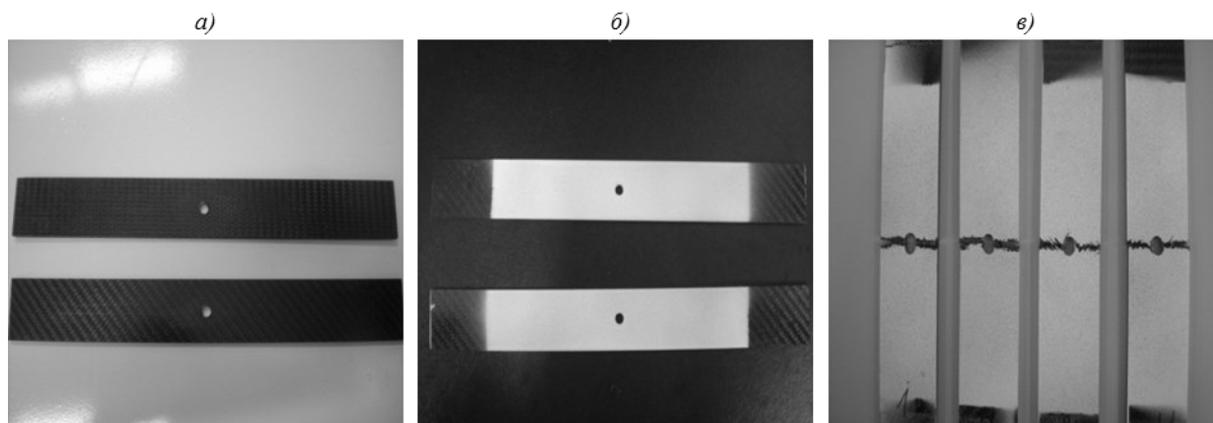


Рис. 1. Образцы из углепластика с отверстием в исходном состоянии (а), с нанесенной областью распознавания (б) и после испытания (в)

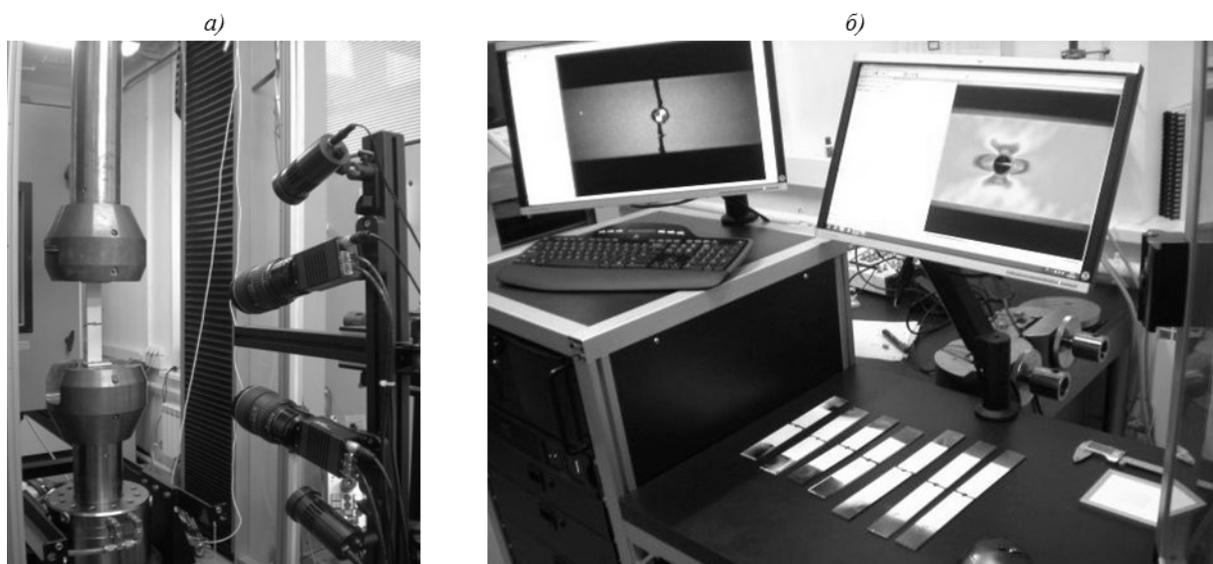


Рис. 2. Система измерения полей перемещений и деформаций в системе Vic 3D с цифровыми камерами (а) и вычислительным комплексом (б)

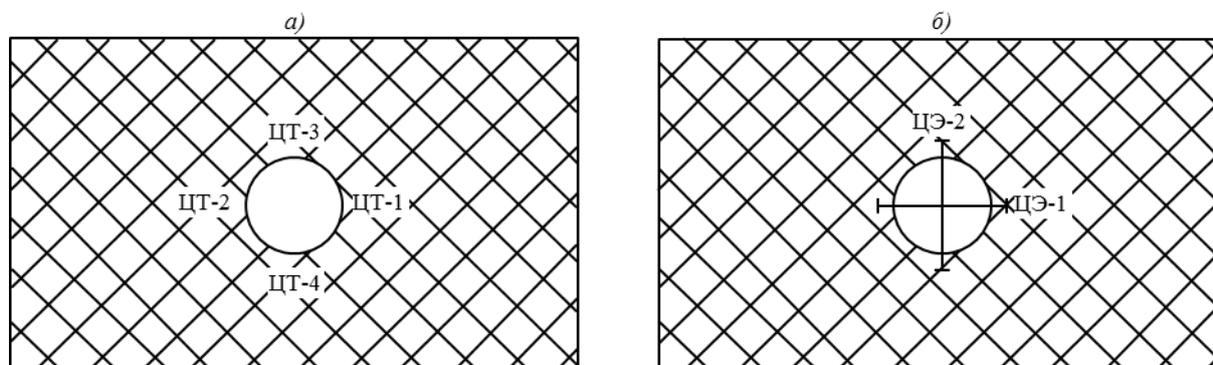


Рис. 3. Схема расположения цифровых датчиков деформации в программе обработки цифровых изображений системы Vic 3D:

а – цифровые тензорезисторы (ЦТ); б – цифровые экстензометры (ЦЭ)

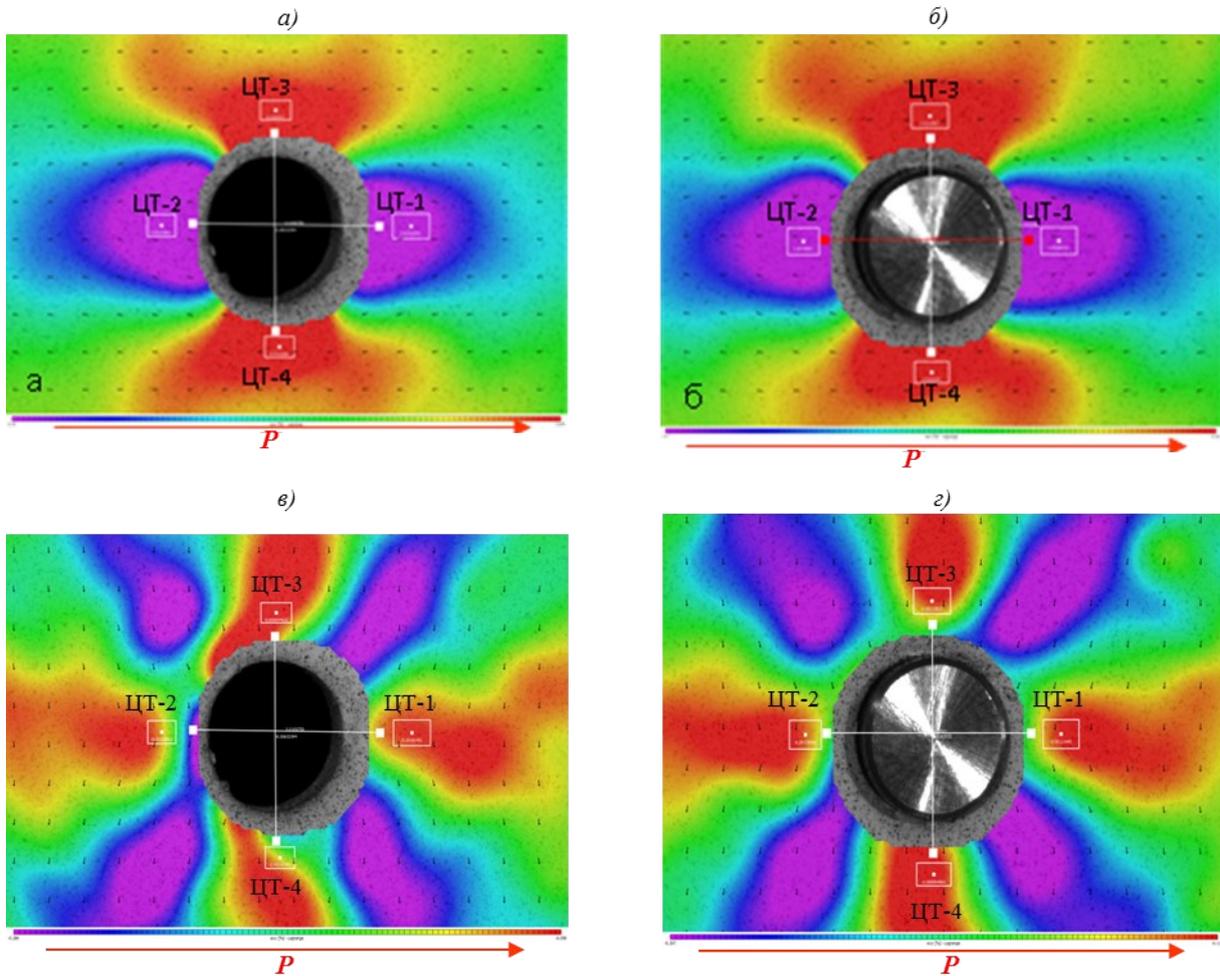


Рис. 4. Измерение полей деформаций на образцах из углепластика с открытым (а, в) и заполненным (б, г) отверстиями по осям ϵ_{xx} (а, б) и ϵ_{yy} (в, г); P – направление приложения нагрузки

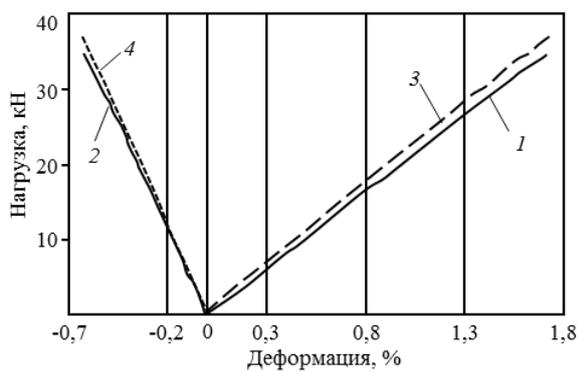


Рис. 5. Диаграмма напряженно-деформационного состояния образцов с открытым (1, 2) и заполненным (3, 4) отверстиями, измеренная цифровыми экстензометрами ЦЭ-1 (1, 3) и ЦЭ-2 (2, 4)

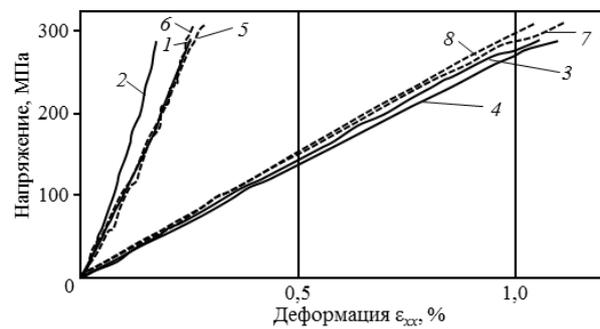


Рис. 6. Диаграмма напряженно-деформационного состояния образцов с открытым (1-4) и заполненным (5-8) отверстиями, измеренная по оси приложения нагрузки (ϵ_{xx}) цифровыми тензорезисторами ЦТ-1 (1, 5), ЦТ-2 (2, 6), ЦТ-3 (3, 7) и ЦТ-4 (4, 8)

**Значения деформации образцов с открытым и заполненным отверстиями
при максимальной интенсивности напряжений**

Тип датчика	Деформация, %	
	Открытое отверстие	Заполненное отверстие
Цифровые тензорезисторы		
ЦТ-1	0,25	0,28
ЦТ-2	0,17	0,25
ЦТ-3	1,06	1,14
ЦТ-4	1,11	1,02
Цифровые экстензометры		
ЦЭ-1	0,63	0,64
ЦЭ-2	1,70	1,74

деформационные характеристики углепластика на основе эпоксидного связующего марки ВСЭ-1212 и углеродной равнопрочной ткани Porcher 3692, схема укладки армирующего наполнителя квази-изотропная $[\pm 45^\circ, 0^\circ, 90^\circ]_{ns}$ [11–17]. Образцы исследовались методом механического испытания при растяжении с заполненным и открытым отверстиями по стандартам ASTM D5766, ASTM D6742 (рис. 1) [18–21]. Испытания проводились на универсальной механической испытательной машине Walter+bai LFM-100 (класс 0,5 – от 200 Н до 100 кН). Нагрузка, измеряемая силовым датчиком испытательной машины посредством аналогового сигнала, синхронизировалась с цифровым сигналом системы Vic 3D.

Для определения полей деформаций использовалась оптическая система измерения Vic 3D (рис. 2): диапазоны измерений – от 1 мм² до 10 м², скорость съемки при полном разрешении 7 кадров/с, локальная разрешающая способность по перемещению 0,01 пикселя (соответствует 1 мкм для области 100×100 мм). Диапазон измеряемой деформации – от 0,005%. На образцы предварительно нанесена область распознавания. Рабочая часть образца окрашена белой матовой краской, обеспечивающей фон. Затем черной матовой краской наносились метки, необходимые для корреляции данных по их смещению. Образец статически нагружался до разрушения, измерения проводились в упругой и пластической зоне деформации материала. Исходный размер зазора между диаметром отверстия и диаметром стержня не больше 0,02 мм.

Цель эксперимента заключалась в установлении характера влияния наполнителя отверстия в виде стержня на деформационное состояние углепластика, армированного равнопрочной углеродной тканью.

После проведения анализа скоррелированных изображений деформируемого образца выявлена локальная область сложно-напряженного состояния, инициируемая отверстием. Деформация измерялась цифровыми тензорезисторами (ЦТ, рис. 3, а; 4) и цифровыми экстензометрами (ЦЭ, рис. 3, б; 4), схема их расположения на образцах указана на рис. 3.

Приведенные в данной статье результаты – ввиду большого объема обрабатываемых данных – представлены только для одного образца с заполненным и одного образца с открытым отверстием. Значения напряженно-деформационных характеристик для всех образцов не превышают 5%-ного отклонения от среднего значения.

С применением оптической системы корреляции цифровых изображений, при проведении механических испытаний при растяжении образцов с отверстием, удалось определить поля деформаций образца и выявить влияние концентратора (открытого и заполненного отверстий) на напряженно-деформационное состояние композиционного материала вплоть до разрушения (см. рис. 4). В ходе проведения измерений определена величина деформационных характеристик на различных участках образца (рис. 5 и 6). Установлено, что для углепластика на основе равнопрочной углеродной ткани и эпоксидного связующего степень влияния концентратора напряжений в виде стержня по сравнению с открытым отверстием не существенна, о чем свидетельствуют значения деформации, измеренной цифровыми экстензометрами и тензорезисторами (см. таблицу). Изменение геометрических размеров заполненного и открытого отверстий в процессе деформирования имеет одинаковый характер. Деформация в поле сложно-напряженного состояния (вокруг отверстия) также практически идентична (кроме зоны ЦТ-2), о чем свидетельствует незначительный разброс значений в пределах доверительного интервала 0,95.

Результаты испытаний обусловлены относительной малой степенью деформирования материала ($\epsilon < 2,5\%$) и практически отсутствием зоны пластической деформации, а также ориентированной схемой армирования (квазиизотропная укладка слоев тканого равнопрочного углеродного наполнителя), позволяющей перераспределить локальные напряжения по площади материала. Все эти факторы позволяют минимизировать критические напряжения в зоне отверстия.

Заключение

Таким образом, установлено, что присутствие наполнителя (стержня) в открытом отверстии об-

разца при растяжении углепластика на основе углеродной равнопрочной ткани и эпоксидного связующего не сказывается на его напряженно-деформационном состоянии. Однако характер полей деформаций и деформационных характери-

стик для прочих видов армирующих наполнителей и полимерных матриц (различных по структуре и химическому составу) может существенно отличаться.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
3. Sutton M.A., Orteu J.-J., Schreier H. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Columbia. University of South Carolina. 2009. 364 p.
4. Третьякова Т.В., Третьяков М.П., Вильдеман В.Э. Оценка точности измерений с использованием видеосистемы анализа полей перемещений и деформаций //Вестник ПНИПУ. Сер. Механика. 2011. №4. С. 15–28.
5. Плешанов В.С., Кибиткин В.В., Напряшкин А.А., Солодушкин А.И. Измерение деформации материалов методом корреляции цифровых изображений //Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 312. №2. Приложение. С. 343–349.
6. Вильдеман В.Э., Третьякова Т.В., Третьяков М.П. Экспериментальное исследование закономерностей деформирования и разрушения материалов при плоском напряженном состоянии //Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. №5. С. 106–111.
7. Шах В. Справочное руководство по испытаниям пластмасс и анализу причин их разрушения: Пер. с англ. СПб.: Научные основы и технологии. 2009. 732 с.
8. Зозуля В.В., Мартыненко А.В., Лукин А.Н. Механика материалов. М.: «НУВД». 2001. 404 с.
9. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение. 1988. 272 с.
10. Черепанов Г.П. Механика разрушения композиционных материалов. М.: Наука. 1983. 296 с.
11. Препреги и изделие, выполненное из него: пат. 2427594 Рос. Федерация; опубл. 21.12.2009.
12. Эпоксидное связующее для препрегов, препрег на его основе и изделие, выполненное из него: пат. 2335515 Рос. Федерация; опубл. 25.10.2006.
13. Эпоксидное связующее, препрег на его основе и изделие, выполненное из него: пат. 2424259 Рос. Федерация; опубл. 22.10.2009.
14. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Чурсова Л.В., Коган Д.И. Новые полимерные связующие для перспективных методов изготовления конструктивных волоконистых ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 38–42.
15. Соколов И.И., Раскутин А.Е. Углепластики и стеклопластики нового поколения //Труды ВИАМ. 2013. №4 (viam-works.ru).
16. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Ким М.А., Бабин А.Н. Расплавные связующие для перспективных методов изготовления ПКМ нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 260–265.
17. Мухаметов Р.Р., Меркулова Ю.И., Чурсова Л.В. Термореактивные полимерные связующие с прогнозируемым уровнем реологических деформационных свойств //Клеи. Герметики. Технологии. 2012. №5. С. 19–21.
18. ASTM D5766/D5766M-11. Standard Test Method for Open-Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates.
19. ASTM D6742/D6742M-12 Standard Practice for Filled-Hole Tension and Compression Testing of Polymer Matrix Composite Laminates.
20. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 440–448.
21. Генералов А.С., Мурашов В.В., Косарина Е.И., Бойчук А.С. Построение и анализ корреляционных связей для оценки прочностных свойств углепластиков реверберационно-сквозным методом //Авиационные материалы и технологии. 2014. №1. С. 58–63.