
Научная статья

УДК 620.17

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-111-122

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДЕФОРМАТИВНОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ВБЛИЗИ КОНЦЕНТРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ

П.В. Шершак¹, Н.О. Яковлев¹, Е.И. Орешко¹

¹ НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация: Результаты проведенных расчетов и полученные экспериментальные данные показывают необходимость учета распределения полей деформации на образцах с концентраторами напряжений для подбора корректных баз оптических датчиков деформации. Возможность устанавливать определенные базы оптических датчиков при конкретных геометрических параметрах образца позволяет получать значения жесткостных и деформационных характеристик на образце с отверстиями, близкие к значениям характеристик материала, что может быть использовано, например, при проведении исследовательских работ в условиях ограниченности материалов.

Ключевые слова: углепластик, оптический датчик деформации, бесконтактный датчик деформации, видеоэкстензометр, деформация, база датчика, метка

Для цитирования: Шершак П.В., Яковлев Н.О., Орешко Е.И. применение оптических датчиков деформации для оценки деформативности образцов из полимерных композиционных материалов вблизи концентраторов напряжений // Труды ВИАМ. 2022. № 1 (107). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-111-122.

Scientific article

APPLICATION OF OPTICAL DEFORMATION SENSORS FOR ESTIMATING THE DEFORMATIVITY OF CFRP SAMPLES NEAR THE STRESS CONCENTRATORS

P.V. Shershak¹, Nikolay O. Yakovlev¹, Evgeny I. Oreshko¹

¹NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract: The results of the calculations and the obtained experimental data show the need to take into account the distribution of strain fields on samples with stress concentrators for the selection of the correct gage of optical strain gauges. The ability to install certain gage of optical sensors with specific geometric parameters of the sample allows one to obtain the values of the stiffness and deformation characteristics on the sample with holes close to the values of the material characteristics, which can be used, for example, when carrying out research work in conditions of limited materials.

Keywords: CFRP, optical strain gauge, non-contact strain gauge, video extensometer, strain, gauge base, mark

For citation: Shershak P.V., Yakovlev N.O., Oreshko E.I. Application of optical deformation sensors for estimating the deformativity of CFRP samples near the stress concentrators. *Trudy VIAM*, 2022, no. 1 (107), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-111-122.

Введение

Испытания и исследования образцов материала с целью установления его свойств (в частности, физико-механических) – один из главных этапов при проведении

квалификации материала. При этом необходимым условием является получение достоверных данных о свойствах материала [1–4].

В настоящее время существует большое разнообразие средств измерений, позволяющих с высокой точностью определять измеряемые в процессе испытаний величины. Так, для определения упругих характеристик материалов используют датчики деформации, основными видами которых являются: тензорезисторы; навесные экстензометры, закрепляемые на образце; встроенные в испытательные машины датчики деформации с изменяемой базой (расчетной длиной); оптические (бесконтактные) экстензометры [5–9].

Каждый из приведенных датчиков деформации обладает определенными достоинствами и недостатками в зависимости от его назначения.

В последнее время наибольший интерес представляют оптические датчики деформации: лазерные экстензометры, видеоэкстензометры, системы корреляции цифровых изображений и пр. Принцип работы оптических датчиков заключается в том, что они «следят» за перемещением меток, нанесенных на образец (у некоторых моделей датчиков метки ставятся виртуально на видеоизображении образца), и по изменению расстояния между метками в процессе нагружения образца получают данные о его деформации.

Данные датчики имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с другими типами датчиков. Например, оптические датчики не требуется закреплять на самом образце, они могут проводить измерения вплоть до разрушения образца, в том числе снимать данные с образца, находящегося в термо- или криокамерах (через смотровое стекло) и пр. Для некоторых видов оптических датчиков, которые не требуют установки физических меток на образце, неочевидным преимуществом является возможность записи видеоизображений, с которыми можно работать впоследствии – после разрушения образца, т. е. по сути, провести испытание образца еще раз и, например, измерить его деформацию между другими точками.

Имея возможность гибко изменять расположение точек (меток), между которыми измеряется деформация на образце (базу датчика), можно индивидуально подходить к измерению деформаций нестандартных или конструктивно-подобных образцов.

Данная работа посвящена выбору корректного расстояния между метками оптических датчиков деформации и, как следствие, подбору геометрических размеров образца для получения объективных данных о жесткостных и деформационных характеристиках образцов с концентраторами напряжений в виде отверстий.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2. «Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов, неразрушающий контроль» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [3].

Материалы и методы

Проведенное в работе исследование основывается на анализе моделей образцов методом конечных элементов и сопоставлении результатов расчетов с данными, полученными в ходе серии экспериментов.

Объектами исследования являлись плоские образцы с центральным отверстием из углепластика на основе однонаправленного препрега со схемой укладки слоев армирующего наполнителя $[0/90]_2$, с габаритными размерами образцов 200×36 мм и толщиной 1 мм.

В данной работе рассматриваются образцы двух типов, различающиеся диаметром отверстия: 8 и 16 мм, а также образец без отверстия.

Модели рассматриваемых образцов, применяемые при анализе методом конечных элементов, приведены на рис. 1.

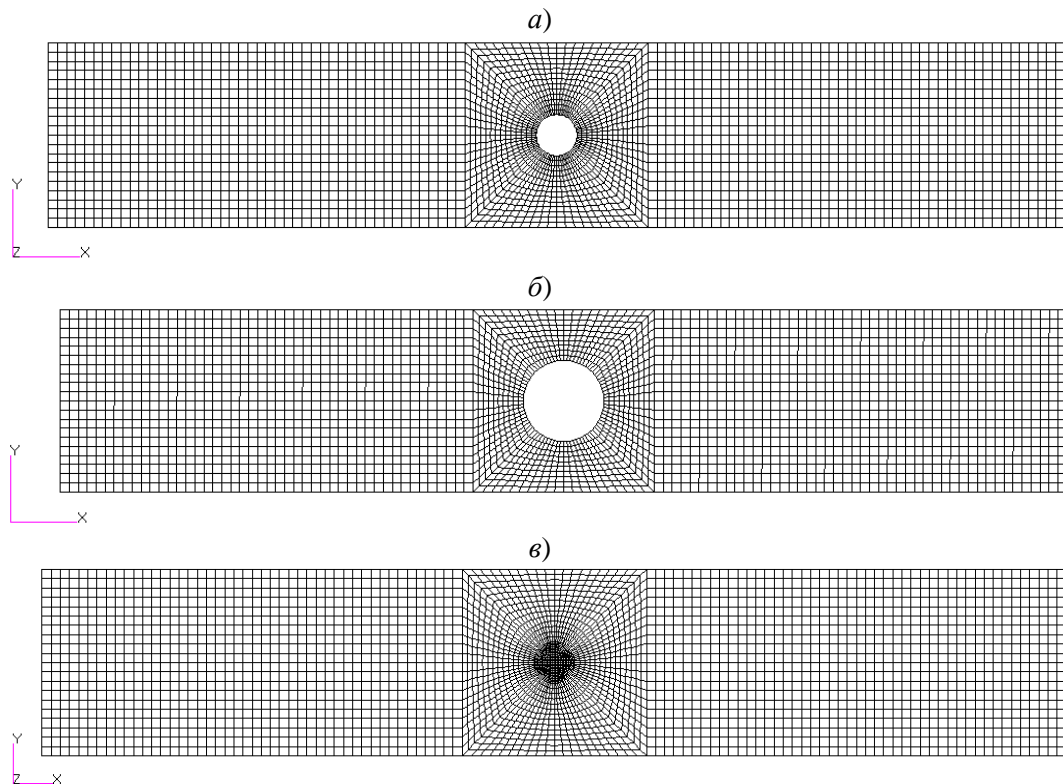


Рис. 1. Модели исследуемых образцов с диаметром отверстия 8 (а), 16 мм (б) и без отверстия (в), применяемые при анализе методом конечных элементов

Приведены конечно-элементные модели образцов на основании четырехузловых оболочечных элементов Quad4, размер конечного элемента в регулярной зоне всех образцов составляет $1,8 \times 1,8$ мм.

Расчетная схема для всех типов образцов принята идентичной и показана на рис. 2 на примере сплошного образца.

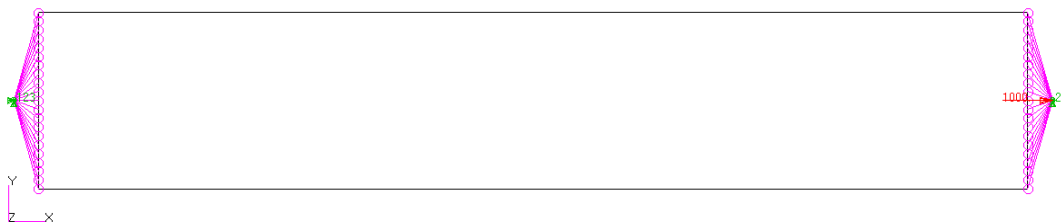


Рис. 2. Расчетная схема образцов

При помощи элементов жесткой связи RBE2 моделируются:

- запрет перемещений по всем поступательным степеням свободы на одной из коротких сторон образца (на рис. 2 – слева);
- запрет поступательных перемещений в плоскости YZ с действующим внешним растягивающим усилием по направлению оси X (в данном исследовании к образцам прикладывалась сила, заведомо не превышающая усилие разрушения образцов при испытании, – равная 1000 Н) для противоположной короткой стороны образца (на рис. 2 – справа).

Значения физико-механических характеристик углепластика, использованные в расчетах и при проведении экспериментов, следующие:

Модуль упругости при растяжении в направлении оси армирования, ГПа	148
Модуль упругости при растяжении в направлении, перпендикулярном оси армирования, ГПа	8
Модуль сдвига в плоскости армирования, ГПа	4,5
Коэффициент Пуассона в плоскости армирования	0,35
Предел прочности при растяжении в направлении оси армирования, МПа	2375
Предел прочности при сжатии в направлении оси армирования, МПа	1465
Предел прочности при растяжении в направлении, перпендикулярном оси армирования, МПа	95
Предел прочности при сжатии в направлении, перпендикулярном оси армирования, МПа	220
Предел прочности при сдвиге в плоскости армирования, МПа	95

Толщина элементарного слоя композиционного материала принималась равной 0,125 мм исходя из толщины монослоя отформованного материала.

Результаты и обсуждение

На основании принятых физико-механических характеристик углепластика расчетным путем с учетом общепринятых критериев разрушения композиционных материалов [10, 11] и методик численного анализа механики их разрушения [12] определены упругие характеристики углепластика с укладкой армирующего наполнителя $[0/90]_{2s}$:

- модуль упругости углепластика в направлении оси армирования $E_x = 63,9$ ГПа;
- модуль упругости углепластика в направлении, перпендикулярном оси армирования $E_y = 63,9$ ГПа;
- модуль сдвига углепластика в плоскости армирования $G_{xy} = 4,2$ ГПа;
- коэффициент Пуассона при растяжении в плоскости армирования $\mu_{xy} = 0,0441$.

Для сплошного образца (в случае отсутствия центрального круглого отверстия) при испытании на растяжение должна быть получена соответствующая характеристика жесткости. Проведенный конечно-элементный анализ сплошного образца это подтверждает. Эпюра перемещений сплошного образца при действии растягивающего продольного усилия, равного 1000 Н, показана на рис. 3.

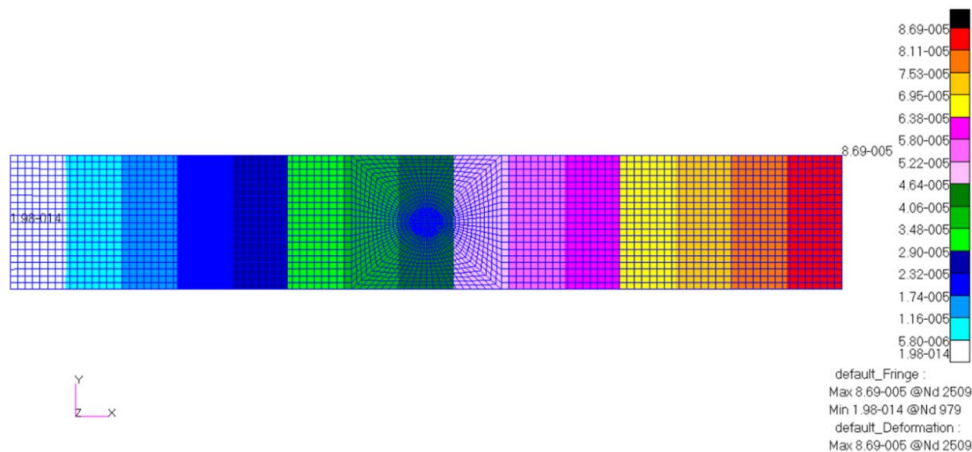


Рис. 3. Эпюра перемещений сплошного образца (данные приведены в м)

Расчетное значение максимального продольного перемещения образца равно $8,69 \cdot 10^{-5}$ м, что при длине образца, равной 0,2 м, соответствует деформации:

$$\epsilon_x = \Delta l / l = 8,69 \cdot 10^{-5} / 0,2 = 4,34 \cdot 10^{-4}.$$

Эпюра деформаций сплошного образца имеет равномерно распределенный характер из-за отсутствия концентраторов в виде отверстий за исключением локальных всплесков в зоне закрепления, не превышающих значение деформации в регулярной зоне более чем на 2 % (максимальное значение продольной деформации в углу образца равно $4,41 \cdot 10^{-4}$). Значение продольной деформации в регулярной зоне образца составляет $4,34 \cdot 10^{-4}$.

Модуль упругости сплошного образца, характеризующий его способность сопротивлению действия силы, равен:

$$E_x = \sigma_x / \epsilon_x = 64 \text{ ГПа},$$

что соответствует полученному ранее точному значению жесткости пакета слоев с данной укладкой ($E_x = 63,9 \text{ ГПа}$).

Очевидно, что, из-за равномерного характера распределения деформаций в сплошном образце (без отверстий), для определения его упругих характеристик база видеоэкстензометра (расстояние между устанавливаемыми на образце метками оптического экстензометра) не является принципиальной. Важно лишь строгое соответствие направления приложения нагрузки с направлением измерения деформаций.

В случае испытания образцов с концентраторами напряжений (деформаций), например в виде отверстий, для получения достоверных результатов об их жесткостных характеристиках необходимо правильно выбирать базу видеоэкстензометра.

На рис. 4 приведены эпюры перемещений при действии растягивающего продольного усилия, равного 1000 Н, полученные для образцов с отверстием диаметром 8 и 16 мм.

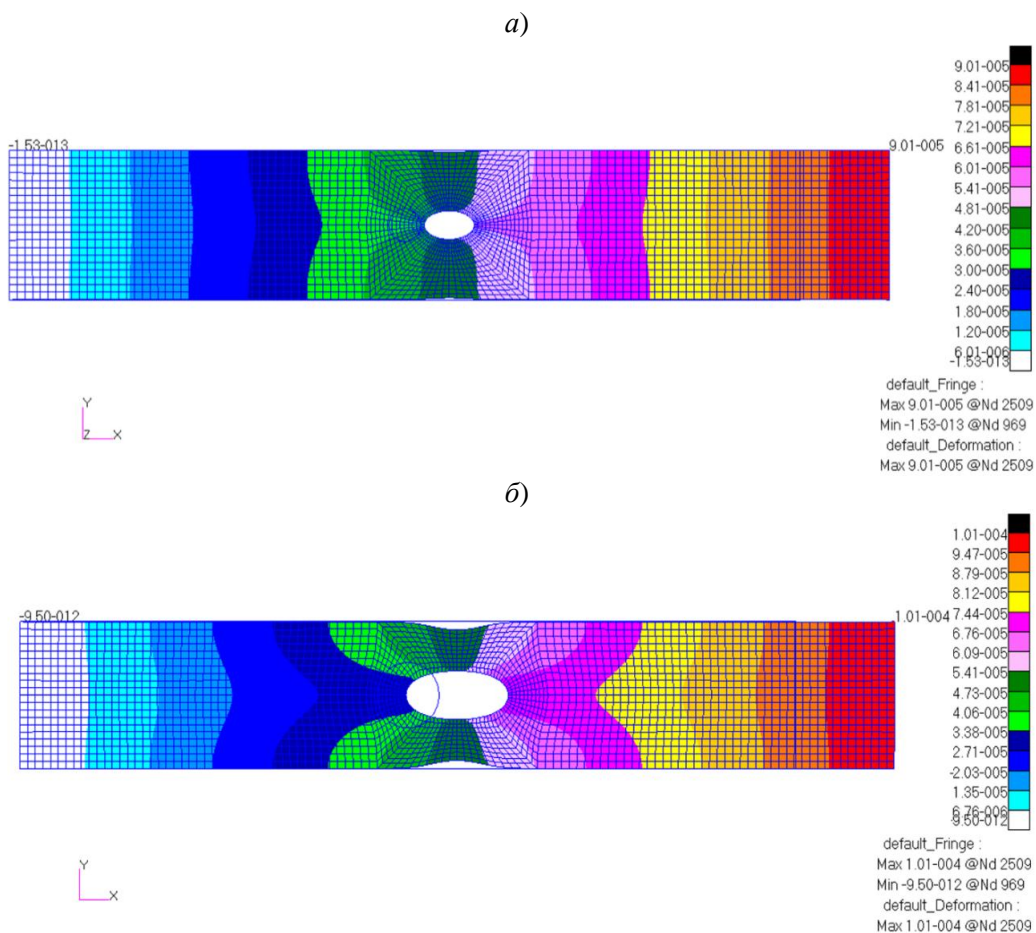


Рис. 4. Эпюры перемещений образцов с диаметром отверстия 8 (а) и 16 мм (б)
(данные приведены в м)

Расчетные значения максимального продольного перемещения образцов с диаметрами отверстия 8 и 16 мм равны $9,01 \cdot 10^{-5}$ и $1,01 \cdot 10^{-4}$ м соответственно.

При длине образцов, равной 0,2 м, соответствующие деформации будут следующими:

- для образца с диаметром отверстия 8 мм

$$\varepsilon_x = \Delta/l = 9,01 \cdot 10^{-5}/0,2 = 4,5 \cdot 10^{-4};$$
- для образца с диаметром отверстия 16 мм:

$$\varepsilon_x = \Delta/l = 1,01 \cdot 10^{-4}/0,2 = 5,05 \cdot 10^{-4}.$$

Жесткость образцов с отверстиями, выражаемая в данной работе через тангенциальный модуль упругости E_t (тангенс угла наклона касательной к линейному участку кривой на диаграмме «напряжение–деформация» образцов с отверстием), характеризующий их способность сопротивлению действия силы, составляет:

- для образца с диаметром отверстия 8 мм

$$E_{tx} = \sigma_x/\varepsilon_x = 61,7 \text{ ГПа};$$
- для образца с диаметром отверстия 16 мм

$$E_{tx} = \sigma_x/\varepsilon_x = 55 \text{ ГПа}.$$

Эпюры деформаций образцов с диаметром отверстия 8 и 16 мм при действии растягивающего продольного усилия, равного 1000 Н, показаны на рис. 5.

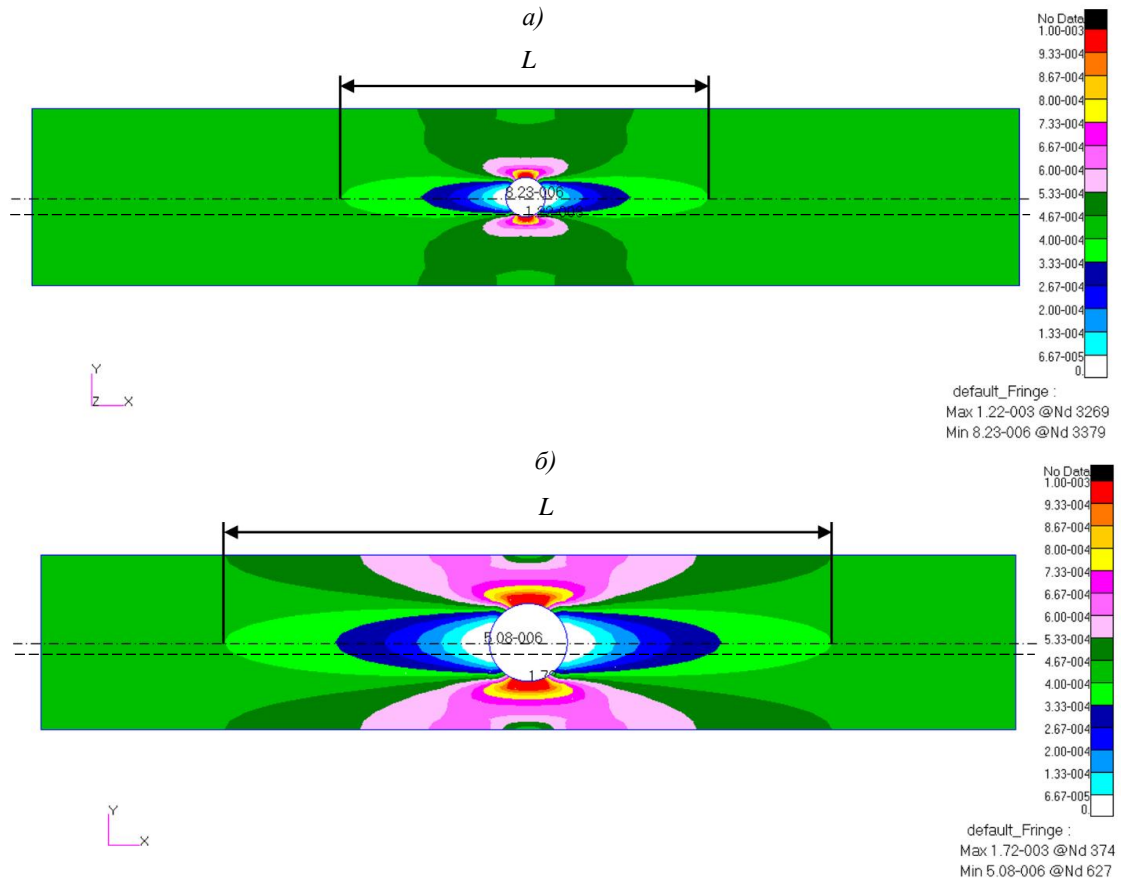


Рис. 5. Эпюры деформаций образцов с диаметром отверстия 8 (а) и 16 мм (б)

Эпюры деформаций образцов с отверстиями имеют ярко выраженную концентрацию вокруг отверстий с различной длиной «затухания» (расстояние L):

- для образца с диаметром отверстия 8 мм – $L = 75$ мм;
- для образца с диаметром отверстия 16 мм – $L = 125$ мм.

Максимальные и минимальные значения продольных деформаций в зоне концентратора образца отличаются от значения деформаций в регулярной зоне образца более чем в 2 раза (в зоне, расположенной максимально близко к отверстию, значения продольных деформаций снижаются в 10 раз по отношению к деформациям в регулярной зоне).

Следует отметить, что деформации образцов с отверстиями разного диаметра, взятые на одинаковых расстояниях от центра отверстия (полученные на одинаковой базе видеоекстензометра), также могут отличаться друг от друга в несколько раз.

Для наглядной демонстрации данного положения повторим процедуру определения деформаций в образцах с помощью «виртуального видеоекстензометра» с базой 30 мм. На рис. 6 показаны места установки меток «виртуального видеоекстензометра» на конечно-элементных моделях образцов с диаметром отверстия 8 и 16 мм.

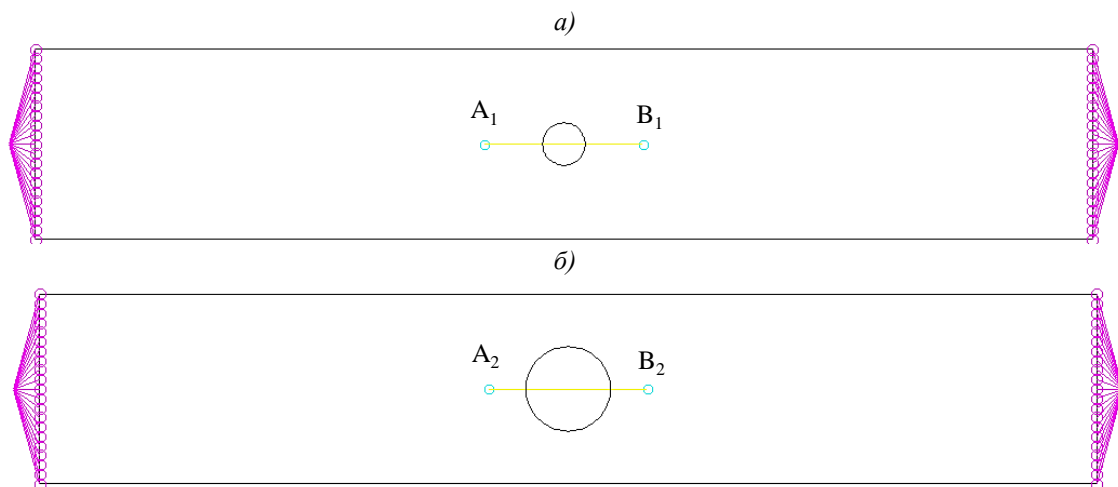


Рис. 6. Места расположения меток «виртуального видеоекстензометра» на конечно-элементных моделях образцов с отверстиями диаметром 8 (а) и 16 мм (б)

Значения продольных перемещений точек A_1 , B_1 , A_2 и B_2 , полученные в результате расчета при действии растягивающего продольного усилия, равного 1000 Н, следующие:

- в точке A_1 – $\Delta l_1 = 3,433 \cdot 10^{-5}$ мм;
- в точке B_1 – $\Delta l_2 = 5,577 \cdot 10^{-5}$ мм;
- в точке A_2 – $\Delta l_3 = 2,972 \cdot 10^{-5}$ мм;
- в точке B_2 – $\Delta l_4 = 7,172 \cdot 10^{-5}$ мм.

Определяем значение деформации образцов, исходя из разности полученных показаний перемещений меток «виртуального видеоекстензометра» (удлинения), отнесенной к базе (30 мм):

- для образца с диаметром отверстия 8 мм

$$\varepsilon_x = (\Delta l_2 - \Delta l_1)/l = (5,577 \cdot 10^{-5} - 3,433 \cdot 10^{-5})/0,03 = 7,146 \cdot 10^{-4};$$
- для образца с диаметром отверстия 16 мм

$$\varepsilon_x = (\Delta l_4 - \Delta l_3)/l = (7,172 \cdot 10^{-5} - 2,972 \cdot 10^{-5})/0,03 = 14 \cdot 10^{-4}.$$

Жесткость образцов с отверстиями (тангенциальный модуль E_t), определенная на основании показателей деформации «виртуальных видеоекстензометров», будет равна:

- для образца с диаметром отверстия 8 мм:

$$E_{tx} = \sigma_x/\varepsilon_x = 38,8 \text{ ГПа};$$

– для образца с диаметром отверстия 16 мм:

$$E_{tx} = \sigma_x / \varepsilon_x = 19,8 \text{ ГПа.}$$

Экспериментальные испытания проведены на образцах с отверстиями диаметрами 8 и 16 мм, вырезанных из плит, полученных методом прямого прессования из того же материала и с той же укладкой, используемых в расчетах ранее и при базе видеоэкстензометра 30 мм. Полученные результаты приведены в таблице.

Результаты испытаний образцов из углепластика с отверстиями

Условный номер образца	Разрушающая нагрузка, Н	Прочность при разрушении (нетто)*, МПа	Жесткость образцов (тангенциальный модуль E_t), ГПа
Образцы с диаметром отверстия 8 мм			
1	12771	466	41,6
2	13958	510	41,8
3	15149	562	39,0
4	14740	550	38,8
5	15222	563	41,6
Среднее значение	14368	530	40,6
Образцы с диаметром отверстия 16 мм			
6	10963	560	21,5
7	10109	532	19,2
8	12518	649	21,4
9	11324	593	21,5
10	11612	604	21,5
Среднее значение	11305	587	21,0

*С учетом отверстия.

Полученные при расчете значения тангенциального модуля хорошо соотносятся с экспериментальными данными, полученными с применением видеоэкстензометра.

Дополнительно проведено сравнение показателей деформаций видеоэкстензометра при испытании образца с диаметром отверстия 16 мм с расчетом на различных базах и местах расположения меток на образце. Расположение меток видеоэкстензометра на реальном образце показано на рис. 7.

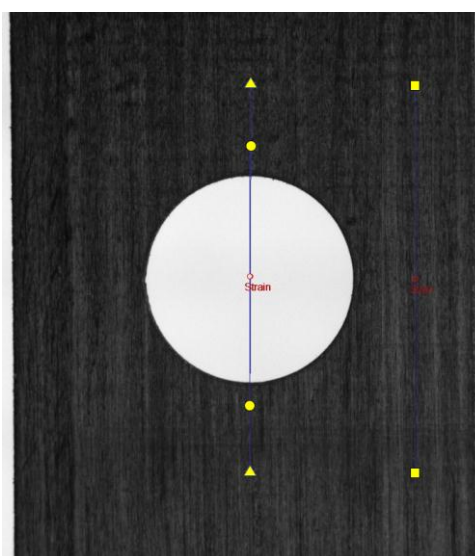


Рис. 7. Расположение меток видеоэкстензометра при испытании образца с диаметром отверстия 16 мм

Базы видеоэкстензометра № 1 (между треугольными метками на рис. 7) и № 2 (между круглыми метками на рис. 7) установлены по центру образца в направлении действия силы, расстояние между одинаковыми метками 30 и 20 мм соответственно. База видеоэкстензометра № 3 (между квадратными метками на рис. 7) установлена на равноудаленном расстоянии между краем образца и кромкой отверстия, расстояние между метками 30 мм. На рис. 8 приведены сравнительные диаграммы «нагрузка–деформация», полученные при проведении испытаний и по результатам конечно-элементного расчета; номера кривых соответствуют принятым номерам баз видеоэкстензометров, буквами «р» и «э» обозначены кривые, полученные соответственно расчетным методом и в результате эксперимента.

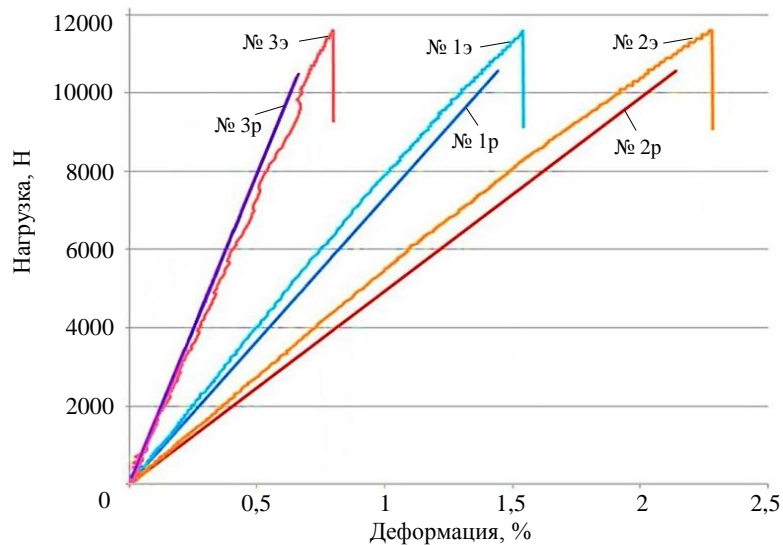


Рис. 8. Диаграммы «нагрузка–деформация», полученные расчетным методом (обозначены буквой «р») и с использованием видеоэкстензометров (обозначены буквой «э»)

Небольшое отличие в углах наклонов графиков объясняется использованием на стадии конечно-элементного анализа технической информации о физико-механических характеристиках материала, которые отличаются от реальных ввиду различий партий материала и особенностей технологий его переработки. Высокая сходимость полученных результатов и их характер наглядно демонстрируют корректность проведенных расчетов и, как следствие, влияние на измеряемую деформацию образцов с отверстиями расстояния между метками видеоэкстензометра и их расположения на образце.

Заключения

Результаты проведенного эксперимента подтверждают полученные при расчете данные. Следует сделать вывод, что при измерении деформационных характеристик образцов с концентраторами напряжений необходимо учитывать распределение полей деформации на таких образцах для корректного подбора их длины и обеспечения необходимой базы датчиков деформации. Кроме того, расчеты и результаты эксперимента показывают, что при определенных базах датчиков деформации и геометрических параметрах образца на образцах с отверстиями возможно получить значения характеристик, близких к значениям упругих характеристик материала образцов. Следует отметить, что использованные в данной работе базы датчиков деформации (расстояние между метками L) могут применяться только для материала с приведенными характеристиками и использованной геометрической формой образцов. Для других материалов

и геометрических размеров образцов и отверстий необходимо определять базы датчиков деформации отдельно.

Использование подобного подхода получения деформационных характеристик образцов с отверстиями на первый взгляд представляется затруднительным или нереализуемым, поскольку требуется каждый раз проводить расчеты и иметь в наличии данные о физико-механических характеристиках материала, не всегда доступные в полном объеме. Однако следует учитывать, что в настоящее время существуют современные оптические системы измерения деформации, такие как система корреляции цифровых изображений [13–15], которые снимают распределения полей деформации на поверхности образца прямо в процессе его испытания, что позволяет существенно сократить, а в некоторых случаях полностью исключить проведение расчетов с целью выбора корректной базы измерения деформации.

Таким образом, использование современных оптических систем измерения деформации при проведении физико-механических испытаний позволяет получать значения характеристик образцов с отверстиями, близкие к значениям упругих характеристик материала образцов, что может быть использовано, например, при проведении исследовательских работ в условиях ограниченности материалов путем «объединения» испытаний элементарных образцов и образцов с отверстиями.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
2. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
3. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. Каблов Е.Н., Подживотов Н.Ю., Луценко А.Н. О необходимости создания единого информационно-аналитического центра авиационных материалов РФ // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2019. № 3. С. 28–34.
5. Афанасьев А.В., Рабинский Л.Н., Шершак П.В. Экспериментальное определение деформационных и прочностных характеристик полимерных композиционных материалов // Механика композиционных материалов и конструкций. 2010. Т. 16. № 2. С. 214–222.
6. Ерасов В.С. Современные методы оценки физико-механических свойств материалов // Сборник докладов Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат-2012». М.: ВИАМ, 2012. С. 13.
7. Луценко А.Н., Одинцев И.Н., Гриневиц А.В., Северов П.Б., Плугатарь Т.П. Исследование процесса деформации материала оптико-корреляционными методами // Авиационные материалы и технологии. 2014. № S4. С. 70–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-70-86.
8. Никитин А.В., Крылов В.Д., Ханжин В.Г. Аппаратура и методика наблюдения в реальном времени деформационной неустойчивости при растяжении тонкой алюминиевой фольги // Вестник Тамбовского университета. 2013. Т. 18. № 4-2. С. 1871–1872.
9. Панин С.В., Бурков М.В., Любутин П.С., Алтухов Ю.А., Еремин А.В., Хижняк С.А. Применение датчика деформации интегрального типа при циклических испытаниях композиционного материала на основе углеродных волокон // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56. №12-2. С. 186–191.
10. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Гриневиц Д.В., Шершак П.В. Обзор критериев прочности материалов // Труды ВИАМ. 2019. № 9 (81). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.05.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-108-126.

11. Гриневи́ч Д.В., Яковлев Н.О., Славин А.В. Критерии разрушения полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 7 (79). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.05.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-92-111.
12. Косарев В.А., Азиков Н.С., Алипов А.Е. Методика решения физически нелинейных задач прочности конструкции с концентраторами напряжений // Авиационная промышленность. 2014. № 2. С. 26–31.
13. Третьякова Т.В., Спаскова Е.М. Экспериментальное исследование предельных напряженно-деформированных состояний квазихрупкого материала с использованием метода корреляции цифровых изображений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Сер.: Механика. 2013. № 2. С.186–198.
14. Ильичев А.В., Раскутин А.Е. Исследование влияния концентратора напряжений на напряженно-деформационное состояние углепластика методом корреляции цифровых изображений // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 3 (32). С. 62–66. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-62-66.
15. Ильичев А.В., Губин А.М., Акмеев А.Р., Иванов Н.В. Определение области максимальных сдвиговых деформаций для образцов углепластика по методу Иосипеску, с использованием оптической системы измерений // Труды ВИАМ. 2018. № 6 (66). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.05.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-99-109.

Reference

1. Kablov E.N. New generation materials – the basis of innovation, technological leadership and national security of Russia. *Intellekt i tekhnologii*, 2016, no. 2 (14), pp. 16–21.
2. Raskutin A.E. Development strategy of polymer composite materials. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2017, no. S, pp. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
3. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. Kablov E.N., Podzhivotov N.Yu., Lutsenko A.N. On the need to create a unified information and analytical center for aviation materials of the Russian Federation. *Problemy mashinostroyeniya i avtomatizatsii*, 2019, no. 3, pp. 28–34.
5. Afanasyev A.V., Rabinsky L.N., Shershak P.V. Experimental determination of deformation and strength characteristics of polymer composite materials. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksiy*, 2010, vol. 16, no. 2, pp. 214–222.
6. Erasov V.S. Modern methods for assessing the physical and mechanical properties of materials. *Collection of reports of the All-Russian conference on testing and research of properties of materials "TestMat-2012"*. Moscow: VIAM, 2012, p. 13.
7. Lutsenko A.N., Odintsev I.N., Grinevich A.V. i dr. Study of material deformation by optical-correlation methods. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2014, no. S4, pp. 70–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-70-86.
8. Nikitin A.V., Krylov V.D., Khanzhin V.G. Equipment and technique for real-time observation of deformation instability during stretching of thin aluminum foil. *Vestnik Tambovskogo universiteta*, 2013, vol. 18, no. 4-2, pp. 1871–1872.
9. Panin S.V., Burkov M.V., Lyubutin P.S., Altukhov Yu.A., Eremin A.V., Khizhnyak S.A. Application of an integral-type strain gauge in cyclic testing of a composite material based on carbon fibers. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika*, 2013, vol. 56, no. 12-2. S. 186-191.
10. Oreshko E.I., Erasov V.S., Grinevich D.V., Sershak P.V. Review of criteria of durability of materials. *Trudy VIAM*, 2019, no. 9 (81), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 11, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-108-126.
11. Grinevich D.V., Yakovlev N.O., Slavin A.V. The criteria of the failure of polymer matrix composites (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 7 (79), paper no. 11. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: May 11, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-92-111.

12. Kosarev V.A., Azikov N.S., Alipov A.E. Technique for solving physically nonlinear problems of structural strength with stress concentrators. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 2014, no. 2, pp. 26–31.
13. Tretyakova T.V., Spaskova E.M. Experimental study of the limiting stress-strain states of a quasi-brittle material using the digital image correlation method. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta*, ser.: Mekhanika, 2013, no. 2, pp. 186–198.
14. Ilichev A.V., Raskutin A.E. Research of stress concentrator influence on stress-strain state of carbon by digital images correlation method. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 3, pp. 62–66. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-61-62.
15. Ilichev A.V., Gubin A.M., Akmeev A.R., Ivanov N.V. Definition of area of the maximum shear deformations for CFRP samples on Iosipescu method, with use of optical system of measurements. *Trudy VIAM*, 2018, no. 6 (66), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 11, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-99-109.

Информация об авторах

Шершак Павел Викторович, заместитель начальника лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Яковлев Николай Олегович, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Орешко Евгений Игоревич, кандидат технических наук, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Pavel V. Shershak, Deputy Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Nikolay O. Yakovlev, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Evgeny I. Oreshko, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 09.08.2021; одобрена после рецензирования 19.08.2021; принята к публикации 19.08.2021.
The article was submitted 09.08.2021; approved after reviewing 19.08.2021; accepted for publication 19.08.2021.