

Высокие значения фототока зарегистрированы при кальцинировании образцов на воздухе, это связано более развитой удельной поверхностью, которая образуется при спекании TiO_2 на воздухе. Однако можно однозначно утверждать, что присутствие оксида графена в пленках TiO_2 приводит к повышению фотокаталитической активности. При этом, фотокаталитическая активность эффективней, когда оксид графена расположен под слоем TiO_2 .

Литературы:

1. Zhang H., Lv X.J., Li Y.M., Wang Y., Li J.H. P25-graphene composite as a high performance photocatalyst // ACS Nano. – 2010. – № 4. – P. 380-6.
2. Bach U., Lupo D., Comte P., Moser J.E. et al. Solid-state dye-sensitized mesoporous TiO_2 solar cells with high photon-to-electron conversion efficiencies // Nature. – 1998. – Vol. 395. – P. 583–585.
3. Y. Zhang, Z-R. Tang, X. Fu and Y. Xu TiO_2 Graphene Nanocomposites for Gas-Phase Photocatalytic Degradation of Volatile Aromatic Pollutant: Is TiO_2 Graphene Truly Different from Other TiO_2 Carbon Composite Materials? ACS Nano 2010, vol. 4, № 12, 7303–7314.
4. X. Pan, Y. Zhao, S. Wang, Zh. Fan. TiO_2 /graphene nanocomposite for photocatalytic application. Materials and processes for energy: communicating current research and technological developments. 2013.

В.И. Гончаренко¹, С.Л. Васильев¹, С.А. Дмитриев¹, С.А. Юргенсон¹, В.М. Юров²
¹ *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия, fv0@mai.ru.* ² *Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова, Караганда, Республика Казахстан, exciton@list.ru*

Экспериментальное исследование методом вычислительной рентгеновской томографии изменения структуры полимерного композиционного материала

В настоящее время технологии производства элементов и изделий из композиционных материалов (КМ) развиваются опережающими темпами практически во всех промышленно развитых странах. Особенность КМ состоит в том, что они не являются монолитным материалом, как, например, металлы. КМ – это конструкция, создаваемая в процессе изготовления изделия [1-3]. Стоит проблема объективной оценки качества КМ, возможности применения различных физических методов для контроля их качества. Расчетно-аналитические методы исследования не всегда позволяют получить полную картину всех возникающих при эксплуатации эффектов в полимерных композиционных материалах [4, 5].

Оценку соответствия материалов, заготовок и конечной продукции можно проводить с применением различного лабораторного и промышленного оборудования. Одним из методов дефектоскопии и анализа геометрических размеров изделия является метод вычислительной рентгеновской томографии [5].

Промышленная рентгеновская вычислительная томография (ВРТ) – высокоэффективный метод неразрушающего радиационного контроля, сочетающий возможности рентгеновского излучения и цифровой техники, позволяющий с высокой точностью получать плоские сечения и объемные изображения контролируемых изделий. Наличие такого оборудования на кафедре «Технологическое проектирование и управление качеством» Московского авиационного института (национального исследовательского университета) позволяет проводить некоторые работы по оценке соответствия военной продукции [6, 7].

Предлагаемая работа находится на стыке нескольких направлений – развития методики применения высокоэнергетической томографии в механике структурно-неоднородных материалов и технологического проектирования [8-14]. В рамках данных направлений предлагается разработать перспективные методы исследования новых материалов, скорректировать методики проектирования изделий из полимерных композиционных

материалов и разработать методы расчетно-аналитической оценки поведения изделия при эксплуатации с учетом технологических дефектов.

В работе [7] описан метод применения ВРТ при решении задач исследования состояния структуры материала ПКМ под нагрузкой. Основные данные, которые были получены в данной работе связаны с оценкой развития трещины в материале и измерения на основе компьютерного моделирования ее вклада в снижение прочности образца. В тоже время, предлагаемый в настоящей работе метод исследования позволяет не только оценить развитие трещины при силовом воздействии, но и проанализировать изменения материала в зависимости от наличия и уровня нагружения. Так же вводятся параметры, позволяющие сравнивать склонность материала к накоплению повреждений при различных технологических процессах.

Для оценки изменений при силовом воздействии непосредственно под нагрузкой был спроектирован и изготовлен стенд, позволяющий прикладывать к образцам силовое одноосное воздействие непосредственно на рабочем столе рентгеновского томографа. На рис. 1 представлена схема проведения исследования с использованием данного стенда. В качестве исходных фиксированных параметров выступают характеристики образца и его механические свойства, которые применяются для выбора шагов нагружения (составления плана эксперимента).

Проведение испытаний подразумевает определение базового состояния материала – томографических параметров, которые считаются исходными для данного образца (выбранной технологии, укладки и типов связующего и наполнителя). Далее производится пошаговое нагружение по выбранным уровням нагрузки. На каждом шаге производится фиксация состояния материала и определяются томографические параметры, которые сравниваются с базовым состоянием, что позволяет оценивать изменения, происходящие в материале – рост аномалий плотности, связанных как с разрыхлением материала, так и с его локальным уплотнением. Для отслеживания уплотнения отдельных участков контролируется максимальное значение линейного коэффициента ослабления (ЛКО).

На каждом шаге увеличения нагрузки выполняются следующие действия:

- каждый исследуемый образец устанавливается в стенд для силового воздействия на образец и проводится исходный замер деформации и предварительное сканирование по всем выбранным сечениям;
- к образцу прикладывается нагрузка, величина соответствует первому шагу нагружения, замеряются деформации в образце и проводится сканирование;
- образец выдерживается под нагрузкой (временная экспозиция) в течении времени, необходимого для сканирования всех выбранных сечений, производится замер изменения уровня усилия и деформаций и проводится сканирование;
- образец разгружается (полное снятие усилия растяжения) и сразу же проводится замер деформаций и сканирование;
- после определенного времени после снятия нагрузки проводится повторный замер деформаций и сканирование;
- разгрузка и дальнейшее нагружение образца производится в соответствии с планом проведения эксперимента;
- далее образец нагружается до уровня второго шага и процедура исследований повторяется.

Количество шагов увеличения нагрузки повторяется до разрушения образца (или достижения предельного для приспособления усилия) или до появления в образце деформаций, свидетельствующих о полной потере несущей способности (ожидаемо для образцов с косоугольной схемой армирования) [10].

В качестве томографических параметров приняты следующие критерии корреляции между состоянием структуры материала образцов и реконструируемыми результатами сканирования:

1. Среднее значение линейного коэффициента ослабления - количественно характеризует структурную плотность в i -том отсканированном сечении после j -того нагружения ($j=0$ – до нагружения) и прямо пропорционально уменьшается с ростом количества вторичных повреждений на единицу площади сечения;

2. Максимальное и минимальное значения ЛКО, характеризующие процессы роста отдельных дефектов и локальное уплотнение в структуре материала.

3. Среднеквадратичное отклонение (СКО) линейного коэффициента ослабления в отсканированном сечении характеризует амплитуду абсолютного отклонения ЛКО от наиболее вероятной величины, увеличение значения СКО подтверждает увеличение количества вторичных повреждений на единицу площади

В качестве тестовых образцов применялись образцы серии УП-3 (с типовой укладкой $0/\pm 45/90$) из углеродной ленты УОЛ-300-1 (ТУ 1916-167-05763346-96 производство ООО «Аргон») и связующего ЭПС-И-108 (ТУ 2225-047-17411121-2012 производство ООО «Суперпласт»), полученные методом пропитки и формования под двойным вакуумным пакетом. Исследование проводилось в 40 сечениях рабочей зоны с шагом 5 мм для отладки параметров сканирования и анализа повторяемости значений. При необходимости в исследуемой зоне образца может быть заложен концентратор или дефект любого вида.

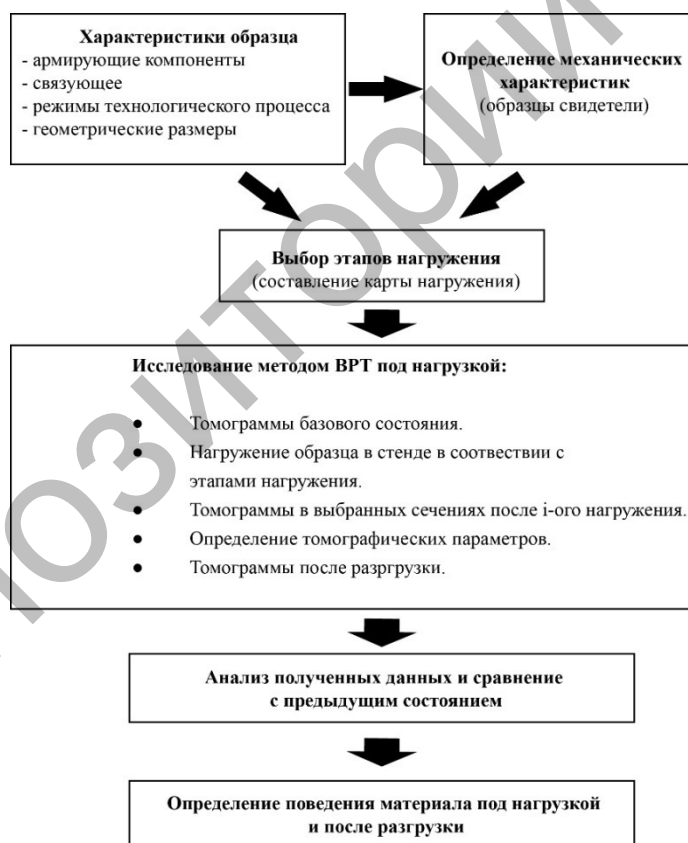


Рисунок 1. Схема проведения исследования

Исследование образца проводилось на четырех уровнях растягивающей нагрузки – 5%, 20%, 30%, 40% от разрушающей нагрузки, а также при дальнейшей его полной разгрузке. В результате были получены графики отклонения контролируемых параметров от исходного состояния образца, представленные на рис. 2. Анализ изменений площади сечения образца

не проводился из-за его незначительных колебаний – изменение площади сечения составляло не более 0,5%, что может быть вызвано неоднородностью поверхности образца.

На основе полученных результатов сделаны следующие выводы:

- при приложении до 30% от разрушающей нагрузки структура образца изменяется с небольшим шагом и не претерпевает значительных изменений – происходит упорядочивание структуры материала, о чем свидетельствует уменьшение отклонения максимальных значений ЛКО и незначительные колебания отклонения минимального значения, которое демонстрирует переменный рост первичного дефекта.

- при достижении 40% от разрушающей нагрузки наблюдается значительное изменение состояния структуры материала. Рост отклонения СКО от исходной величины при достижении 40% разрушающей нагрузки в 2 раза превышает аналогичный показатель при 30% разрушающей нагрузки. Это вызвано значительным ростом первичного дефекта (минимальное значение ЛКО увеличивается в 3 раза по сравнению с 30% от разрушающей нагрузки), что приводит к уплотнению окружающего материала. Такой вывод подтверждается поведением среднего значения ЛКО, которое на 40% от разрушающей нагрузки практически соответствует исходному состоянию образца, при одновременном росте СКО, т.е. разброса значений плотности;

- после разгрузки образца наблюдаются остаточные изменения, которые характеризуются локальным уплотнением структуры образца, значительным по сравнению с нагруженным состоянием, закрытием первичного дефекта (отклонение минимального значения уменьшилось по сравнению с нагруженным состоянием в 6 раз). Общее поведение структуры материала после разгрузки характеризуется увеличением разбросов плотности в образце (отклонение СКО от исходного состояния составляет 10%) и незначительным уплотнением структуры материала (среднее значение ЛКО выросло на 1%), что может означать снижение количества первичных дефектов в образце.

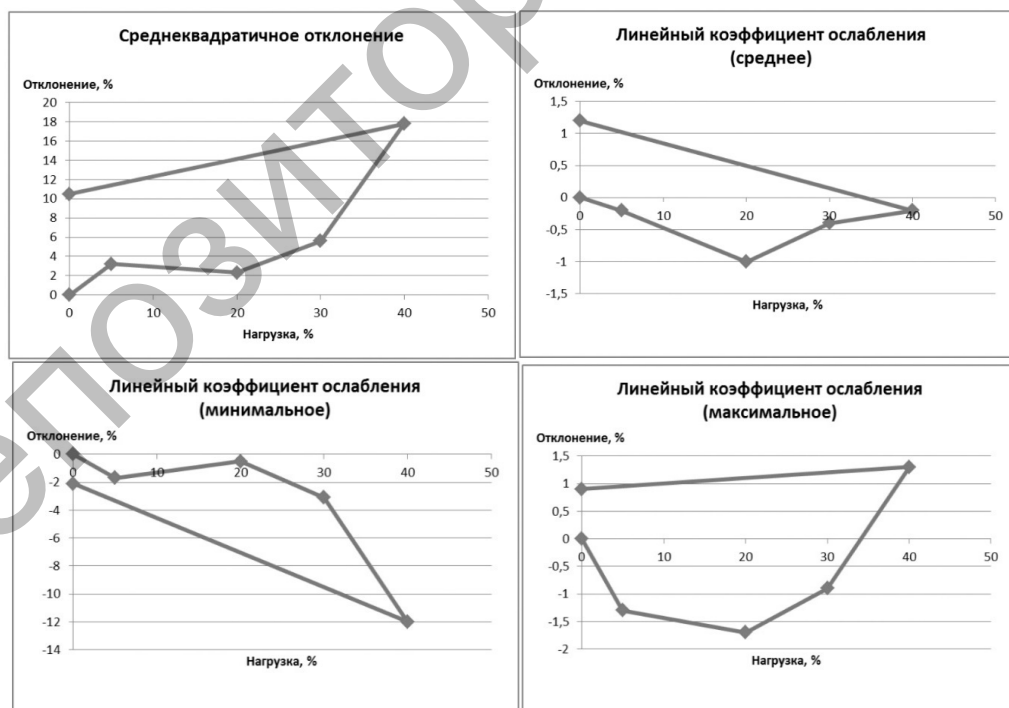


Рисунок 2. Отклонение контролируемых параметров от исходного состояния в зависимости от приложенной нагрузки

По итогам тестового исследования на данном образце можно сделать следующие выводы:

- для данной укладки и материала характерно значительное увеличение магистрального дефекта после достижения определённой нагрузки (в данном случае она составила 30% от разрушающей);
- при приложении нагрузки происходит рост локального первичного дефекта при этом более мелкие дефекты закрываются, и структура материала становится менее рыхлой;
- после разгрузки образца наблюдается общее уплотнение структуры материала, но при этом происходит раскрытие магистрального дефекта [12], который в случае дефектоскопии после снятия нагрузки имеет значительно меньшие геометрические размеры по сравнению с нагруженным состоянием.

Литературы:

1. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы, 2-е издание. М.: Изд-во Научные основы и технологии, 2008. 822 с.
2. Гончаренко В.И., Олешко В.С. Расчёт твёрдости инструмента в авиастроении // СТИН. 2017. № 1. С. 19-21.
3. Гончаренко В.И., Олешко В.С. Определение величины поверхностной энергии инструмента в авиастроении // СТИН. 2017. № 2. С. 24-27.
4. Лурье С.А., Дудченко А.А. Введение в механику нанокompозитов. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010, 160 с.
5. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Сосин, А.В. Ковалев, Э.И. Вайнберг и др. 2-е изд. М. Машиностроение, 2003. 656 с.
6. Методы неразрушающего контроля, применяемые для конструкций из перспективных композиционных материалов / Б.В.Бойцов, С.Л.Васильев, А.Г.Громашев, С.А.Юргенсон // Труды МАИ: электронный журнал. 27.12.2011. Вып. №49. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/>.
7. Васильев С.Л., Артемьев А.В., Юргенсон С.А. Анализ методом вычислительной рентгеновской томографии воздействия статической нагрузки на структуру полимерного композиционного материала. // Материалы X Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ 2014), 25-31 мая 2014 г., Алушта. М.: Изд-во МАИ, 2014. С. 543-545.
8. Nikishkov, Y., Airoidi, L., Makeev, A. Measurement of Voids in Composites by X-Ray Computed Tomog., Composites Science and Technology, 89 (2013), pp. 89-97.
9. Фудзи Т., Дзак М. Механика разрушения композиционных материалов. М.: Мир, 1982. 232 с.
10. Композиционные материалы под ред. Браутмана Л. и Крока Р. Разрушение и усталость. М.: Мир, 1978. Т.5. 483 с.
11. Расчетно-экспериментальная оценка прочности сегмента композитного шпангоута с применением метода in-situ рентгеновского контроля / Н.Н.Потрахов, А.Н.Аношкин, В.Ю.Зуйко, и др. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2017. № 1. С. 118–133. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.1.08.
12. In-situ damage monitoring of textile composites using x-ray computed tomography / W.J. Na, H.C. Ahn, K.M. Park, H.M. Kang, W.R. Yu // ECCM15: 15th European conference on composite materials. – Italy, Venice, 2012.
13. Withers P.J., Preuss M. Fatigue and Damage in Structural Materials Studied by X-Ray Tomography // Annual Reviews. – 2012. – Vol. 42. – P. 81–103. DOI: 10.1146/annurev-matsci-070511-15511.
14. In-situ Analysis of Laminated Composite Materials by X-ray Micro-Computed Tomography and Digital Volume Correlation / R. Brault, A. Germaneau, C. Dupré, P. Doumalin, S. Mistou, M. Fazzini // Experimental Mechanics. – 2013. – Vol. 53. – No. 7. P. 1143–1151. DOI: 10.1007/s11340-013-9730-9.