

Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния поверхностных слоев углепластика при осевом растяжении методом корреляции цифровых изображений

А.М. Устинов¹, А.А. Клопотов^{1,2}, А.И. Потекаев², Ю.А. Абзаев¹, В.С. Плевков¹

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет (Томск, Россия)

²Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия)

Experimental Study of Deformed States of Carbon Plastics Surface Layers in Axial Tension by Digital Images Correlation Method

A.M. Ustinov¹, A.A. Klopotov^{1,2}, A.I. Potekaev², Ju.A. Abzaev¹, V.S. Plevkov¹

¹Tomsk State University of Architecture and Building (Tomsk, Russia)

² National Research Tomsk State University (Tomsk, Russia)

Представлены результаты экспериментальных исследований методом корреляции цифровых изображений, эволюции распределения во времени деформированного состояния поверхностных слоев углепластика в процессе осевого растяжения. Исследования были проведены на образцах из углепластика размерами 250×12×1,5 мм. В качестве матрицы в композите был использован двухкомпонентный эпоксидный состав Resin 530+ с наполнителем из углеродной однонаправленной ткани Tape 530. С ростом степени общей деформации образца при испытании происходит эволюция пространственных структурных элементов деформации от слоистого распределения очагов локальных деформаций на поверхности образца (размерами 2 ÷ 6 мм) с низкими значениями деформации в области этих очагов на более однородное распределение деформации на поверхности (мелкодисперсные области локальных деформаций с размерами меньше 1 мм). Выявленное отсутствие на поверхности углепластика при деформации растяжением значительных локальных очагов деформаций свидетельствует о равномерном распределении деформаций в композите вплоть до стадии, предшествующей его разрушению. Установлено, что при достижении значения деформации порядка 1,8% начинается процесс разрушения углепластика.

Ключевые слова: деформированное состояние, структурные элементы деформации, корреляция цифровых изображений, углепластик, композит.

This paper presents the results of experimental studies of the deformed state distribution evolution of carbon fiber reinforced plastic surface layers under tension. Structural spatial deformation elements evolve as the total deformation increases. The size of the samples of carbon fiber is 250 × 12 × 1.5 mm. The matrix of the composite is the two-component epoxy compound Resin 530+. Filler composite is the unidirectional carbon fabric Tape 530. The layered deformation distribution on the surface of the sample changes into a more uniform distribution. The laminated distribution is characterized by localized deformation foci with dimensions of 2 ÷ 6 mm and a low deformation value. Homogeneous distribution is characterized by finely dispersed regions of local deformations with dimensions less than 1 mm. Local foci of deformations do not merge in the macro-region on the surface of the CFRP, which indicates a uniform distribution of deformations in the composite until destruction. The process of destruction of carbon fiber begins when the total deformation value reaches 1.8%.

Key words: deformed state, structural elements of deformation, correlation of digital images, carbon composite, composite.

Введение

В настоящее время современные композитные материалы получили широкое распространение во многих отраслях современной техники: аэрокосмической, автомобильной, строительной и др. Уникальные удельные характеристики жесткости и прочности и особенности технологии их изготовления позволяют создавать углепластиковые ткани с заданной ориентацией свойств, что способствует выдвиганию данного класса композитов на первый план среди известных композитных материалов.

Всё это приводит к тому, что возникла необходимость определять их прочностные и деформационные свойства при различных видах нагружения. В литературе этому вопросу уделено особое внимание [1–5]. Несмотря на многочисленные работы по анализу и интерпретации известных в литературе экспериментальных данных в настоящий момент нет полного понимания явлений, происходящих в композитах при различных видах силовых воздействий [6, 7].

Для оценки прочности композиционных материалов используют критерии предельных состояний [6–8]. Предельные состояния в композиционных материалах определяются допустимыми границами напряжений, при которых материал может работать при заданных условиях без разрушения. При этом выделяют два критерия перехода в предельные состояния. Первый связан с переходом композиционного материала из упругого состояния в пластическое. Вторым — разрушение композиционного материала. Особенность в выборе критерия предельного состояния определяется феноменологическим подходом: выбор данного критерия основан на макромеханическом поведении композиционных материалов в целом. При этом не учитываются микромеханические особенности процессов перехода из одного состояния композиционных материалов в другое [8, 9].

Все это приводит к тому, что при расчетах используют самые разные критерии прочности и пластичности. Выбор этих критериев определяется многими факторами: особенностью строения композиционного материала; физико-механическими свойствами компонентов, из которых создан композиционный материал; степени анизотропии; известных экспериментальных данных; выбранной концепции расчета и др. Все перечисленное отражает сложность задачи, которую надо решить при определении прочности композиционных материалов. Поэтому важны экспериментальные работы, посвященные определению механических свойств композиционных материалов.

Другой важной задачей при эксплуатации композиционных материалов с учетом требований на-

дежности конструкций, в которых в качестве элементов используются композиты, является задача по определению допустимых сроков их эксплуатации и возможностью рассчитывать особенности потери устойчивости при наступлении предельных состояний отдельных элементов в конструкциях [9].

Среди современных композиционных материалов достаточно широкое распространение получил углепластик, представляющий собой материал из углеродных волокон, пропитанных эпоксидным связующим, который в незатвердевшем состоянии легко формуется. Это дает возможность довольно успешно использовать его для увеличения несущей способности и ремонта бетонных, железобетонных, каменных, стальных и деревянных конструкций [1–5]. Углепластики относятся к классу полимерных композиционных материалов из переплетённых нитей углеродного волокна, расположенных в матрице из полимерных (эпоксидных) смол. Отличительной особенностью этого класса материала является их высокая прочность и жёсткость в сочетании с малой плотностью ($\rho = 1450 \div 2000 \text{ кг/м}^3$) [6, 7]. Например, по удельным характеристикам углепластики превосходят высокопрочную конструкционную сталь 40X [6].

Таким образом, дальнейший прогресс применения композитов в силовых конструкциях зависит от информации о том, как ведет себя композиционный материал в процессе роста нагрузки в упругой области, а также на стадии, предшествующей разрушению композита. Это позволит конструктору провести количественные расчеты предельных напряжений, промоделировать и получить сценарии процессов разрушения элементов и конструкции в целом при помощи современных компьютерных комплексов.

В данной работе представлены результаты исследований эволюции во времени *in situ* распределения областей локальной деформации в приповерхностных слоях углеродных тканей в ходе деформации растяжением.

Материал и методика эксперимента

Для проведения исследований были изготовлены образцы из углепластика размерами $250 \times 12 \times 1,5$ мм. В качестве матрицы в композите использован двухкомпонентный эпоксидный состав Resin 530+. Наполнитель — углеродная однонаправленная ткань Tare 530. Вид переплетения углеродной ткани — плотное, нити основы выполнены из прядей углеволокна шириной 5 мм, нити утка — полиэтиленовая нить (рис. 1). Механические характеристики элементов, из которых изготовлен композит, приведены в таблице.

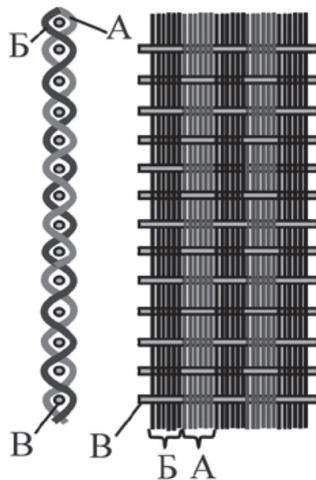


Рис. 1. Схема переплетения пучков углеволокна (А, Б) с нитями из углеволокна (В): а — вид сбоку; б — вид сверху

Для использования цифровой оптической системы VIC-3D в процессе эксперимента необходимо на поверхности образцов создать спекл-картины [10, 11]. Формирование спекл-картины начинается с нанесения белой основы на поверхности образцов, на ко-

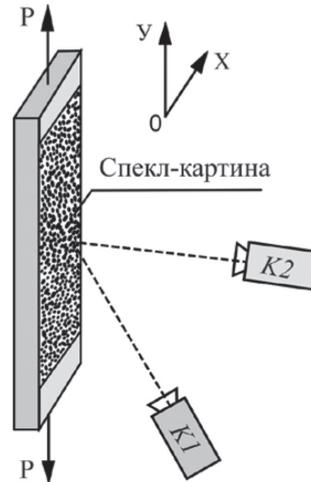


Рис. 2. Схема регистрации изображений со спекл-картины на поверхности углеродной ткани: K1 и K2 — цифровые камеры; P — прикладываемая нагрузка

торую после высыхания наносилось изображение, сформированное из хаотично разбросанных точек одного размера, т.е. изображение со стохастической структурой (рис. 2) [10].

Прочностные характеристики материалов композита

| Параметр | Значение |
|--|-----------------------------|
| Углеродная ткань Tаре 530 | |
| Прочность на растяжение, ГПа | более 4.3 |
| Модуль Юнга, ГПа | более 245 |
| Эпоксидное связующее Resin 530+ | |
| Прочность сцепления (адгезия), МПа | более 2.5, разрыв по бетону |
| Прочность при сдвиге образцов клея (7 дней при 23 °С), МПа | более 10 |

Аппаратура для проведения испытаний

Испытание образцов на растяжение осуществлялось на испытательной машине «INSTRON 3386» с максимальным растягивающим усилием 100 кН (10,19 тс). Деформирование проведено с постоянной скоростью 0.3 мм в минуту. Конструкция захватов испытательной машины обеспечивала надежное фиксирование и центрирование образцов. Оптическая измерительная система VIC-3D использована для определения эволюции распределения деформаций в приповерхностных слоях образца [12, 13]. Схема проведения эксперимента представлена на рисунке 2.

Направление растяжения совпадало с направлением нитей основы углеродной ткани (рис. 1). Деформирование проведено с постоянной скоростью 0.3 мм в минуту. Цифровая оптическая измерительная система VIC-3D (рис. 2) использована для определения эволюции распределения деформаций в приповерхностных слоях образца [1].

Цифровая оптическая система Vic-3D использует принцип корреляции цифровых стереоскопических изображений. В основе метода лежит алгоритм отслеживания перемещения совокупности соседних пикселей. Путем математического пересчета получают значения перемещений и деформаций. Применение двух цифровых видеокамер позволяет получать стереоскопическое изображение поверхности объекта испытаний, соответственно, появляется возможность получения данных по перемещению в трех осях.

Результаты и обсуждение

На рисунке 3 приведена диаграмма образца углепластика. На этой диаграмме видно, что зависимость «напряжение — деформация» практически линейная. Расчет значения модуля Юнга дает значение 38.1 ГПа. Значение относительного удлинения в момент разрушения не превышает 1,2 %, при этом непосредственно упругая деформация, оцененная

по характеру распределения вертикальных относительных деформаций приповерхностных слоях угле-

родной ткани участке кривой деформирования, составляет 0,7 %.

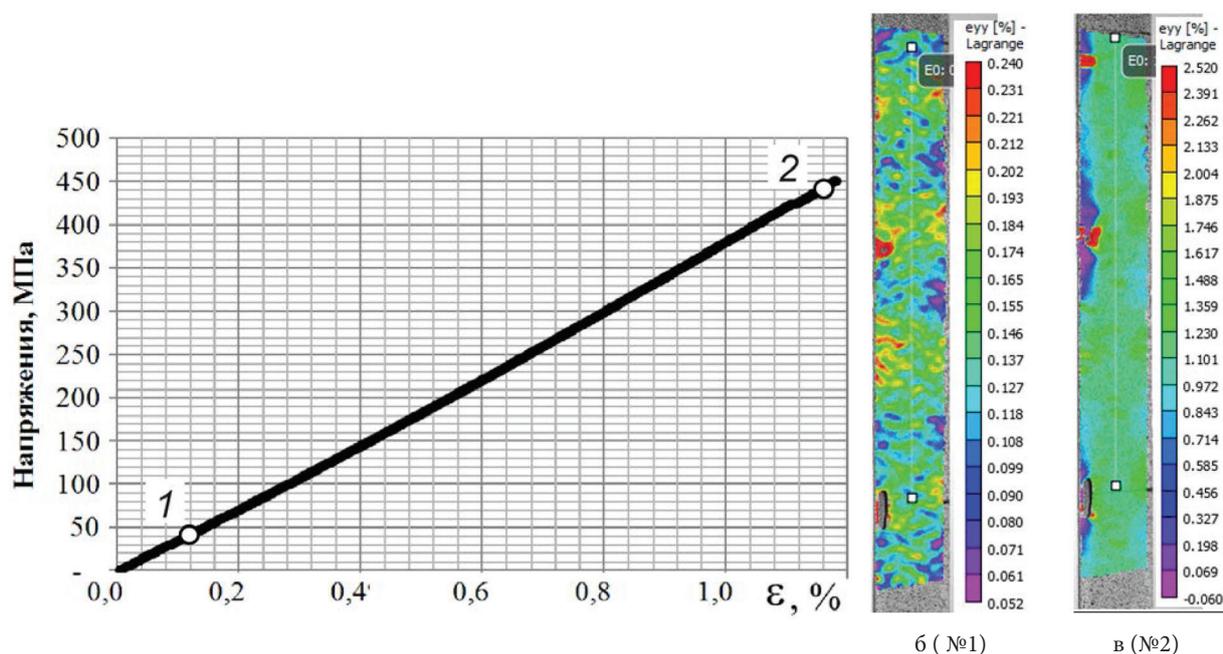


Рис. 3. Кривая деформации в координатах «напряжение — деформация» (а). Цифры на диаграмме соответствуют картинам по распределению вертикальных относительных деформаций приповерхностных слоях углеродной ткани (б, в)

Картины локализованных областей деформаций при напряжении 40 МПа характеризуются хаотически переплетающимся слоистым распределением очагов локальных деформаций на поверхности образца с характерными размерами 2–6 мм с невысокими значениями деформаций в этих очагах (рис. 3б). При напряжениях, предшествующих разрушению образца, картина распределения локальных областей деформации существенно меняется (точка 2 на рисунке 3а и б). Основная площадь поверхности образца заполнена мелкодисперсными областями локальных деформаций с размерами меньше 1 мм и разбросом значений деформации в них от 0,9 до 1,6 %. При этом на боковой поверхности образца существуют очаги высоких локальных деформаций (~ 2,3 %).

При силовых воздействиях на армированные волокнами композиты волокна работают таким образом, чтобы перераспределить большую часть прикладываемой нагрузки на композит, в результате чего обеспечивается высокая прочность (высокие пределы прочности и значения модуля упругости при растяжении). Отсюда следует основное требование для матричной компоненты композита: высокое сцепление его с поверхностью волокон. Выполнение этого условия приводит к тому, что прикладываемое силовое воздействие к композиту передается на волокна. Это

в свою очередь приводит к тому, что волокна в композите воспринимают приложенное напряжение к композиту, препятствуют разрушению поверхности волокон и отделяют их друг от друга, препятствуя тем самым распространению разрушения.

В наиболее простой модели двухкомпонентного композита используется допущение о жесткой связи между матрицей и волокнами, их совместной деформации и подчинении закону Гука. Для того чтобы эта модель как можно лучше соответствовала реальным условиям поведения композиционного материала под нагрузкой, в нашем эксперименте был использован углепластик, представляющий собой систему жестко связанных чередующихся изотропных стержней, обладающих характеристиками волокна, которые были еще и дополнительно связаны нитями из углеволокна и матрицы (см. рис. 1).

На основе макромеханического подхода [8] проведем анализ упругих деформативных характеристик двухкомпонентного армированного композита. При таком подходе армированный композиционный материал рассматривается в качестве анизотропного тела с определенной симметрией структуры. На основе макромеханического подхода и в рамках вышеприведенной физической модели двухкомпонентного композита, содержащего сплошные волокна в ма-

трице, проведем анализ расчета продольного модуля упругости композита вдоль оси ОУ, совпадающей с направлением приложенного внешнего напряжения (см. рис. 2). Расчет здесь проводится по уравнению аддитивности (правило смесей) [8]:

$$E_y = E_f V_f + E_m V_m = E_f V_f + E_m (1 - V_m). \quad (1)$$

При расчете прочностных характеристик композита при растяжении также используют подход, в основе которого лежит уравнение аддитивности. В этом случае прочность двухкомпонентных композитов может быть представлена в виде

$$\sigma_{вх}^p = \sigma_{вф} V_f + \sigma'_m (1 - V_f). \quad (2)$$

В этом уравнении не учтен разброс прочности матрицы и волокон при их совместном деформировании. Для того чтобы учесть эти явления, используют корректирующие коэффициенты. Тогда уравнение (2) принимает вид

$$\sigma_{вх}^p = \sigma_{вф} V_f k_f + \sigma'_m (1 - V_f) k_m, \quad (3)$$

где k_f – коэффициент, учитывающий условия работы волокон в композите; k_m – коэффициент, учитывающий условия работы матрицы при приложенном внешнем напряжении. В коэффициенте k_f необходимо учитывать разные явления: разориентация волокон (коэффициент k_1); разброс значений прочности волокон (коэффициент k_2) и др. Точно так же в коэффициенте k_m необходимо учитывать разные явления: пористость матрицы; влияние внутренних напряжений, вероятность того, что реальные напряжения в матри-

це в момент разрушения композита могут иметь более высокие значения, чем напряжения, проявляющиеся на экспериментальной деформационной диаграмме растяжения матрицы. Для различных по природе композитов коэффициенты k_f и k_m могут принимать широкий спектр значений от 0,1 до 1.

Применение подхода, в основе которого лежит уравнение аддитивности, позволяет учитывать интегрально основные виды взаимодействия матрицы и волокон, но при этом не позволяет учитывать механизм разрушения композита. Несмотря на недостатки этого подхода, его достаточно широко используют при оценочных расчетах. Это основано на том, что этот подход достаточно прост [8].

Заключение

Экспериментальные исследования *in situ* эволюции во времени распределения деформации растяжения образца из углепластика позволили выявить, что с ростом степени общей деформации образца при испытании происходит эволюция пространственных структурных элементов деформации от слоистого распределения очагов локальных деформаций на поверхности образца (размерами 2 ÷ 6 мм) с низкими значениями деформации в области этих очагов на более однородное распределение деформации на поверхности (мелкодисперсные области локальных деформаций с размерами меньше 1 мм). Выявленное отсутствие на поверхности углепластика при деформации растяжением значительных локальных очагов деформаций свидетельствует о равномерном распределении напряжений в композите вплоть до стадии, предшествующей его разрушению.

Библиографический список

1. Manalo A., Sirimanna C., Karunasena W., McGarva L., Falzon P. Pre-impregnated Carbon Fibre Reinforced Composite System for Patch Repair of Steel I-beams // *Construction and Building Materials*. — 2016. — V. 105.
2. Haghani R., Al-Emrani M., Kliger R. Effects of geometrical modifications on behavior of adhesive joints used to bond CFRP laminates to steel members — experimental investigation // *Conference proceedings: NSCC*. — 2009.
3. Heshmati M., Haghani R., Al-Emrani M. Durability of bonded FRP-to-steel joints: Effects of moisture, de-icing salt solution, temperature and FRP type // *Composites Part. B*. — 2017. — V. 119.
4. Ustinov A., Kopanitsa D., Abzaev Yu., Klopotov A. and et. al. Study of deformations evolution near-surface layers of adhesive joints // *AIP Conference Proceedings*. — 2017. — №1800.
5. Chowdhury E.U., Green M.F., Bisby L.A., Bénichou N., Kodur V. K. R. Thermal and Mechanical Characterization of Fibre Reinforced Polymers, Concrete, Steel, and Insulation Materials for use in Numerical Fire Endurance Modelling // *Uneversi ondecce documents etrouvedans: Structures under Extreme Loading, Proceedings of Protect* — 2007, Whistler, B.C. — 2007.
6. Болтон У. Конструкционные материалы: металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты : карманный справочник. — М., 2004.
7. Любин Дж. Справочник по композиционным материалам : в 2 кн. — М., 1998.
8. Карлинос Д.М. Композиционные материалы : справочник. — Киев, 1985.

9. Геракович К. Неупругие свойства композитных материалов // Механика. Новое в зарубежной науке. — М., 1978.

10. Федоров В.С., Копаница Д.Г., Клопотов А.А., Абзаев А.Ю., Устинов А.М., Данильсон А.В., Кошко Б.О. Экспериментальные исследования упругопластической деформации клеевых соединений методом корреляции цифровых изображений // Вестник Томского гос. архитектурно-строит. ун-та. — 2017. — № 2.

11. Копаница Д.Г., Устинов А.М., Поткаев А.И., Клопотов А.А., Марченко Е.С. Изменения напряженно-деформированных состояний приповерхностных слоев ста-

ли в процессе нагружения // Известия вузов. Физика. — 2017. — Т. 60. №9.

12. 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.

13. Третьякова Т.В., Третьяков М.П., Вильдеман В.Э. Оценка точности измерений с использованием видеосистемы анализа полей перемещений и деформаций // Вестник Пермского гос. тех. ун-та. Механика. — 2011. — №2.