

УДК 621.8

Тимофеева Анастасия Георгиевна, магистрант,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, timofeevan@rambler.ru

Никитин Артем Сергеевич, магистрант,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, nzzk@mail.ru

ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. В настоящее время большое внимание в области машиностроения уделяется вопросу снижения металлоемкости изделий. В статье представлено обоснование актуальности производства деталей и узлов машин из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Рассмотрены возможности создания новых промышленных составов ПКМ, а также перспективы повышения точности при проведении их испытаний по определению физико-механических свойств. Выполнено обоснование выбора методов физико-механических испытаний ПКМ с целью определения их прочностных свойств. Проведен анализ отечественных и зарубежных стандартов на проведение физико-механических испытаний ПКМ. Определены основные отличия требований к проведению физико-механических испытаний в отечественной и зарубежной практике. Описываются методы проведения испытаний образцов ПКМ на растяжение и на усталость. Представлен процесс анализа результатов испытаний с применением программно-комплексного метода. Представлены результаты испытания образца ПКМ на растяжение, полученные при помощи компьютерной программы GOM Correlate, а также графики относительных максимальных, средней и минимальных напряжений при проведении циклических испытаний ПКМ на усталость. Представлены результаты амплитудного движения напряжений. При помощи методологии для анализа образцов, используемой зарубежными коллегами из Пармского университета (Италия), была установлена полномасштабная деформационная картина распределения армирующих частиц на поверхности образца.

Ключевые слова: деформация; испытание на усталость; испытание на растяжение; нагружение; полимерные композиционные материалы; программно-комплексный метод; разрушение; метод цифровой корреляции изображений.

Timofeeva Anastasia G., undergraduate,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, timofeevan@rambler.ru

Nikitin Artem S., undergraduate,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, nzzk@mail.ru

FOREIGN EXPERIENCE OF CARRYING OUT PHYSICAL AND MECHANICAL TESTS OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS

Abstract. Currently, much attention in the field of engineering is paid to the issue of reducing the metal consumption of products. The article presents the rationale for the

relevance of the production of parts and components of machines made of polymer composite materials (PCM). The possibilities of creating new industrial compositions PCM, as well as prospects for improving the accuracy when conducting their tests to determine the physico-mechanical properties. The substantiation of the choice of the methods of physicomachanical testing of PCM with the aim of determining their strength properties was carried out. The analysis of domestic and foreign standards for the conduct of physical and mechanical tests of PCM. The main differences of the requirements for carrying out physical and mechanical tests in domestic and foreign practice are determined. Methods for testing tensile and fatigue PCM samples are described. The process of analyzing test results using a software-integrated method is presented. The results of the PCM tensile test, obtained using the GOM Correlate computer program, and the graphs of the relative maximum, average, and minimum stresses during cyclic PCM fatigue tests are presented. The results of amplitude movement of stresses are presented. Using the methodology for analyzing samples used by foreign colleagues from the University of Parma (Italy), a full-scale deformation picture of the distribution of reinforcing particles on the sample surface was established.

Key words: deformation; tensile test; fatigue test; cyclic loads; polymer composite materials; software-integrated method; destruction; DIC (Digital Image Correlation) analysis.

Введение

Снижение металлоемкости изделий при одновременном повышении прочностных характеристик является одной из наиболее важных задач в области машиностроения. В настоящее время данная задача решается путем замещения металлических изделий деталями, изготовленными с применением ПКМ. Возможность создания неметаллических материалов с заранее заданными физико-механическими свойствами, адаптированными под условия эксплуатации изготовленных с их применением изделий, позволяет повысить безотказность и долговечность машин. Применение ПКМ при производстве изделий машиностроения позволяет значительно снизить их массу, что, в свою очередь, способствует снижению энергетических и эксплуатационных затрат на этапе эксплуатации жизненного цикла машин [1].

Разработка новых составов ПКМ невозможна без применения точных методов их физико-механических испытаний. Для повышения темпов проектирования и производства изделий машиностроения к методам испытаний предъявляются не только требования повышенной точности, но и низкой трудоемкости. Решение поставленной задачи

возможно путем применения программно-комплексного метода обработки результатов исследований.

В зависимости от задач проектирования проводят различные виды физико-механических испытаний материалов такие как: испытания на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температурах, на смятие, на сопротивление повреждению при ударе падающим грузом, на сжатие после удара, на растяжение образцов с заполненным и с открытым отверстием и др. [2]. В области машиностроения наибольшее распространение получили испытания ПКМ на усталость и на растяжение [3, 4]. При этом для определения уровней напряжения (деформаций) в циклических испытаниях на усталость предварительно выполняют испытания образцов на растяжение [3].

В международной практике испытания материалов проводятся в соответствии с требованиями стандартов Американского общества по испытаниям материалов ASTM (American Society for Testing and Materials), стандартов Международной организации по стандартизации – ISO, стандартов европейского союза – EN, а также немецких промышленных стандартов – DIN [5].

Разные стандарты различаются используемыми обозначениями, требованиями, предъявляемыми к геометрическим размерам испытываемых образцов, точности приборов измерения и другими расхождениями [5].

Анализ отечественных и зарубежных стандартов в области испытаний полимерных композиционных материалов

В Российской Федерации испытания ПКМ, армированных высокопрочными волокнами, на усталость и на растяжение регламентируются стандартами, являющимися модифицированными по отношению к стандартам ASTM (табл.) [2].

Увеличению количества методов испытаний материалов, представленных в ГОСТ способствует разработка отраслевых документов – ОСТ [5].

Таблица

Отечественные и международные стандарты в области испытания ПКМ

Вид испытаний	Стандарты РФ	Международные стандарты ASTM
Испытание ПКМ на растяжение	ГОСТ Р 56785-2015. Композиты полимерные. Метод испытания на растяжение плоских образцов	ASTM D3039/D3039M-08 «Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials»
Испытание ПКМ на усталость	ГОСТ Р 57143-2016. Композиты полимерные. Метод испытания на усталость при циклических растяжениях	ASTM D3479/D3479 M-12 «Standard test method for tension-tension fatigue of polymer matrix composite materials»

Методика проведения физико-механических испытаний ПКМ

Инженеры предприятия Mitsubishi Chemical (г. Модена, Италия) ведут активную деятельность по разработке, производству и внедрению новых ПКМ. Оценка соответствия свойств созданных материалов заданным требованиям осуществляют на базе университета UNIPR (Università degli Studi di Parma) (г. Парма, Италия) с применением программно-комплексного метода DIC (Digital Image Correlation), который позволяет выполнять цифровую корреляцию изображений процесса деформации при проведении испытаний материалов для получения полномасштабных деформационных распределений на поверхности образца. Цифровая корреляция изображений осуществляется при помощи программного обеспечения GOM Correlate.

Для демонстрации данного метода прессованием были подготовлены образцы ПКМ (рис. 1), в которых связующим является эпоксидная смола (массовая доля 40%), а наполнителем углеродная ткань (массовая доля 60%).

Для передачи более четких показаний и последующего анализа поведения материала перед закреплением в разрывной машине образцы

ПКМ покрываются при помощи аэрозольного баллона красящим пигментом (краской белого цвета), а на поверхность образца ПКМ, подлежащую анализу, наносят случайный рисунок черных пятен.

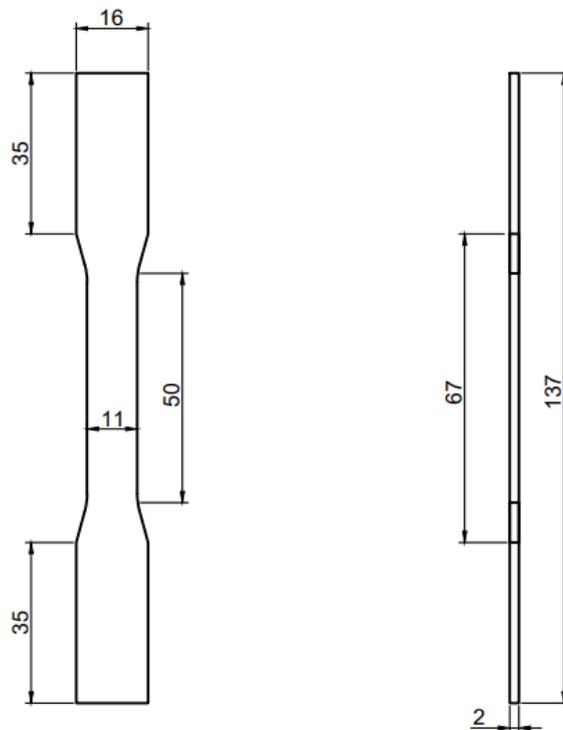


Рис. 1. Образец для проведения испытаний на растяжение и усталость (образцы изготовлены в соответствии ASTM D3039/D3039M-08 «Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials»)

Испытания на растяжение проводились с применением машины сервогидравлической на растяжение – сжатие 810 MTS в соответствии с требованиями ASTM [6], при температуре $22\pm 2^\circ\text{C}$ и относительной влажности $55\pm 5\%$, скорость нижних захватов составляла 0,01 мм/с, прикладываемое усилие – 25 кН. Усилие, прикладываемое к образцу, возрастало пропорционально увеличению деформации материала в процессе испытаний.

Циклические испытания ПКМ на усталость проводились с использованием оборудования в тех же лабораторных условиях, которые описаны в предшествующем испытании.

Регистрация, обработка и анализ полученных данных с использованием программно-комплексного метода DIC

Для анализа, полученных изображений и оценки поведения материала следует использовать метод Цифровой Корреляции Изображений (DIC Digital Image Correlation). Предлагаемая здесь методология для анализа образцов, состоящих из SMC материала, актуальна, для прогнозирования модуля упругости при растяжении. Метод основан на экспериментальном наблюдении, что армирующие частицы распределены случайным образом и что существует случайная повторяющаяся картина локальных максимумов и минимумов для модуля на поверхности образца. Этот шаблон можно выделить в случайные типичные объемные элементы (RRVE) случайных упругих характеристик [8].

Регистрация процесса разрушения образцов осуществлялась с помощью, установленной на штативе цифровой промышленной камеры Basler, сопряженной с программным обеспечением Bandicam. В процессе испытаний образцов на растяжение, была использована компьютерная программа Bandicam, которая позволяет делать снимки промежуточных результатов с экрана монитора в автономном режиме. Компьютерное приложение PylonViewer обеспечивает связь в режиме реального времени видеокамеры, работающей в качестве таймера, с фотокамерой.

Последующая обработка полученных снимков осуществляется при помощи компьютерной программы GOM Correlate, предназначенной для цифровой корреляции изображений и трехмерного слежения за движением образцов (рис. 2). Программа GOM Correlate используется для проведения анализа результатов испытаний [9].

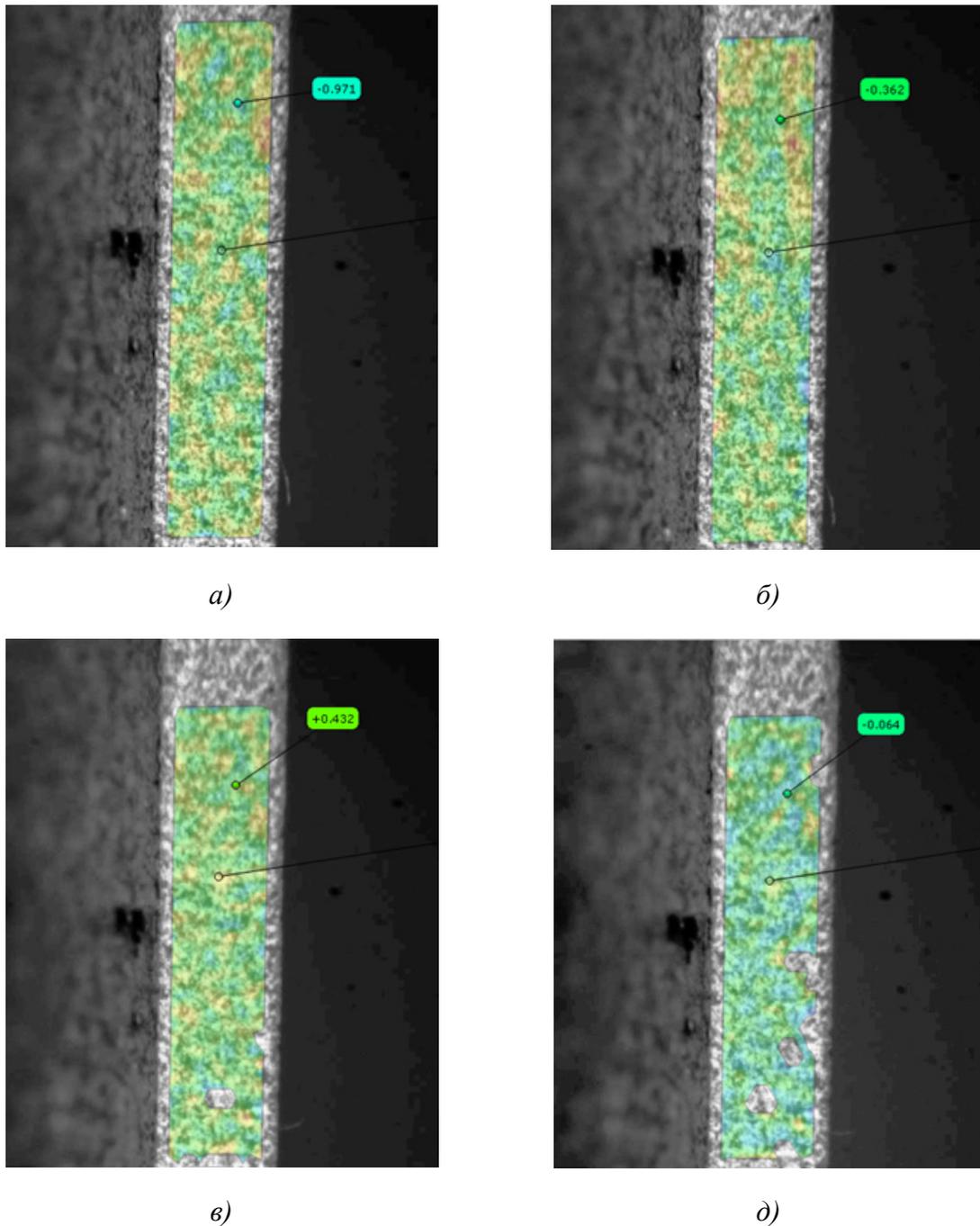


Рис. 2. Результаты испытания образца ПКМ на растяжение, полученные при помощи компьютерной программы GOM Correlate: а – в начале испытаний; б – промежуточные результаты; в – начало процесса разрушения образца; г – окончание испытаний (разрушение образца)

Из полученных снимков видно, что фото-грамматическая система, позволяет измерять большие перемещения и напряжения. Фиксирует изображения деформирующего объекта в заданные промежутки времени во время испытания и сравнивает их, конструируя таким образом в режиме

реального времени график деформации. Эта система цифровой корреляции изображений обеспечивает уникальное представление о полномасштабном деформационном состоянии образцов из-за его бесконтактного и нелокального характера.

При дальнейшем анализе результатов испытаний образцов ПКМ на растяжение применяется программное приложение MOIRE, позволяющее получить более полное представление о деформации за счет преобразования снимков образцов в процессе испытаний в 8-bit изображение, что позволяет уменьшить объем файлов, тем самым обеспечивая возможность анализа большего количества снимков деформированных образцов. Также данное программное приложение позволяет осуществлять мониторинг деформаций образца по X и Y координатам. Мониторинг осуществляется путем последовательного наложения на изображение образца до приложения нагрузок изображений с регистрацией процесса начала деформации и разрушения [10].

Использование метода цифровой корреляции изображений (DIC) для получения полномасштабных деформационных распределений на поверхности образца, показало сложное состояние переменной деформации в образце с предельными точками по всему образцу. Эта схема чередующихся областей высоких и низких градиентов деформаций, которые характеризуются определенной формой и размером, могут быть описаны в терминах RRVE (Random Representative Volume Element) Случайного Типичного (Представленного) Объемного Элемента.

При проведении испытаний образцов ПКМ на усталость в соответствии с ASTM [7] при разных нагрузках (низких и высоких) прослеживается относительное амплитудное движение напряжений в зависимости от времени и циклов.



а)

б)

Рис. 3. Фотоснимки образца после испытания на растяжение:
а – лицевая сторона; б – обратная (тыльная) сторона

На рисунках 4, 5 и 6 представлены графики с показаниями амплитудного движения напряжений в динамике циклов в испытываемых образцах.

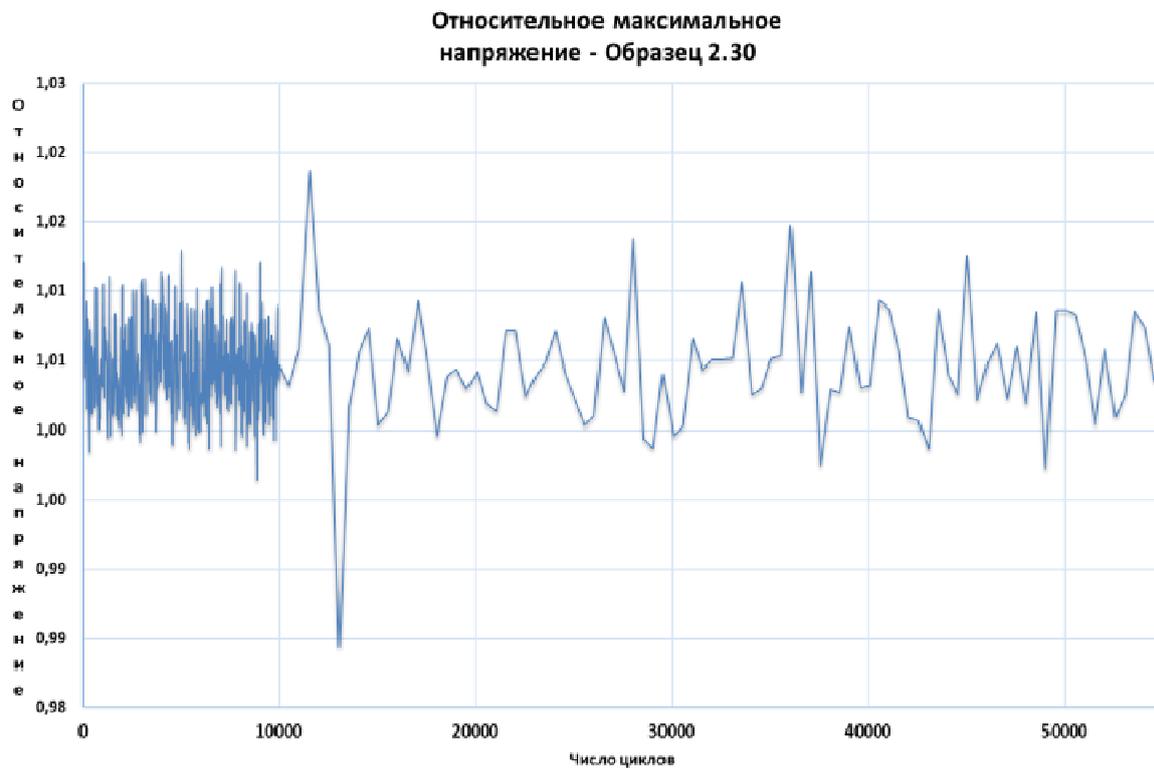


Рис. 4. График относительного максимального напряжения

Относительное среднее
напряжение- Образец 2.30

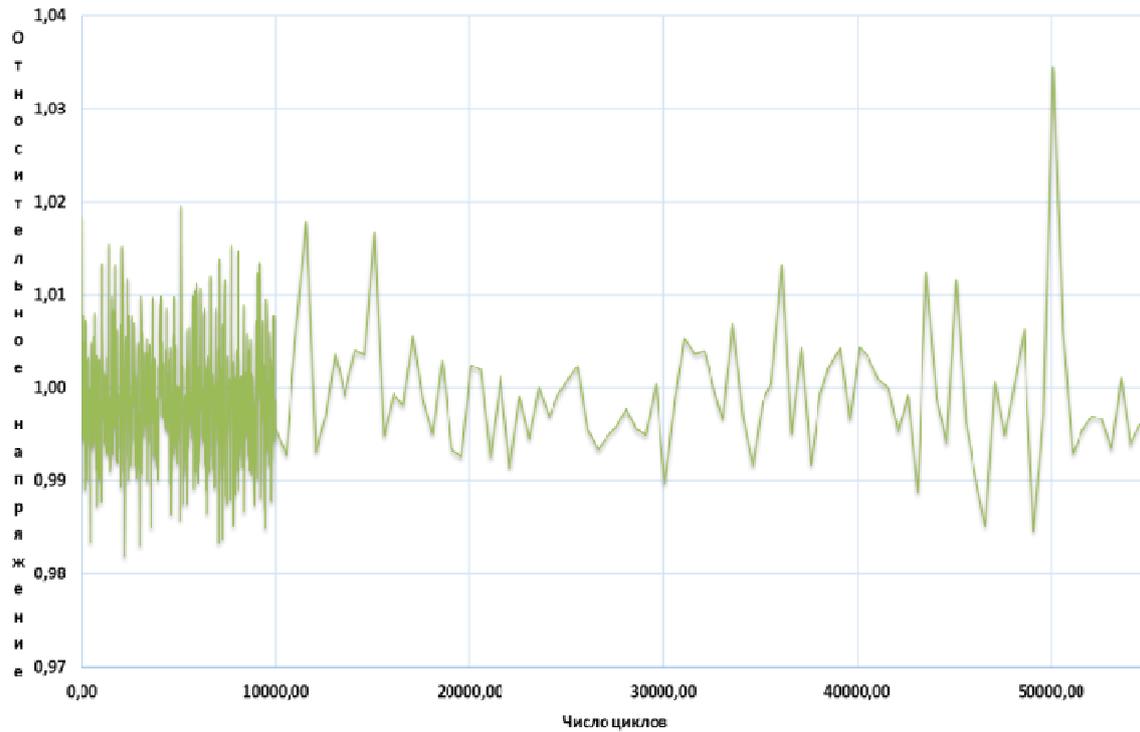


Рис. 5. График относительного среднего напряжения

Относительно минимальное
напряжение - Образец 2.30

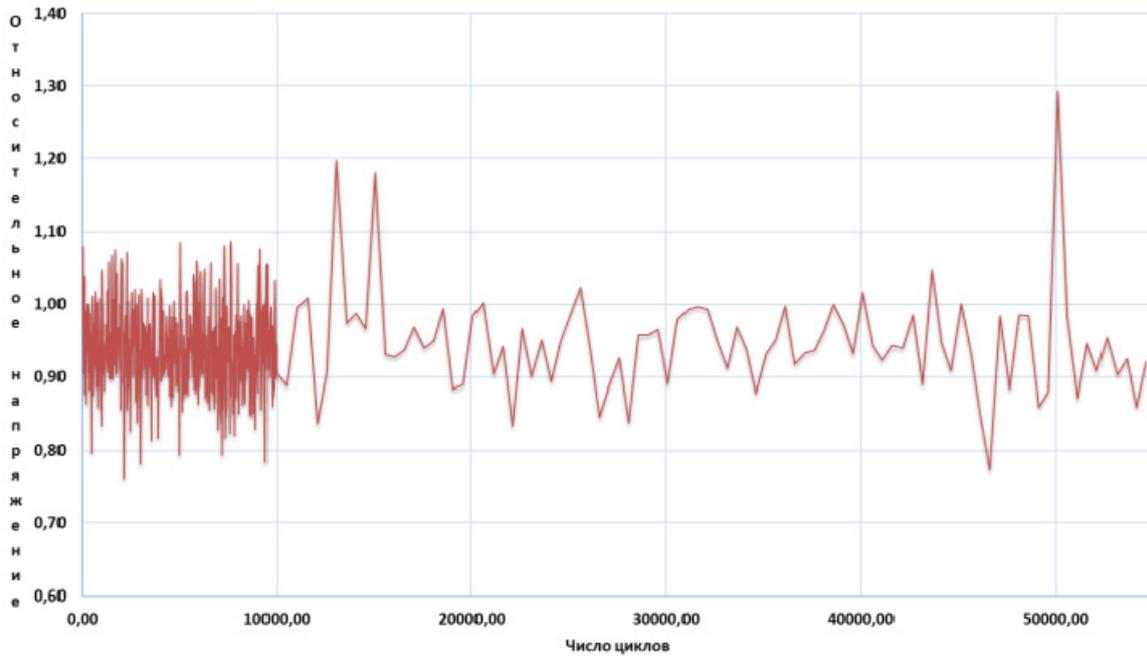


Рис. 6. График относительного минимального напряжения

На рисунке 7 представлен график относительной ширины амплитудного цикла, воспроизведенный при обработке полученных данных усталостных напряжений, с заданным временным промежутком усилия и динамикой частоты циклов.

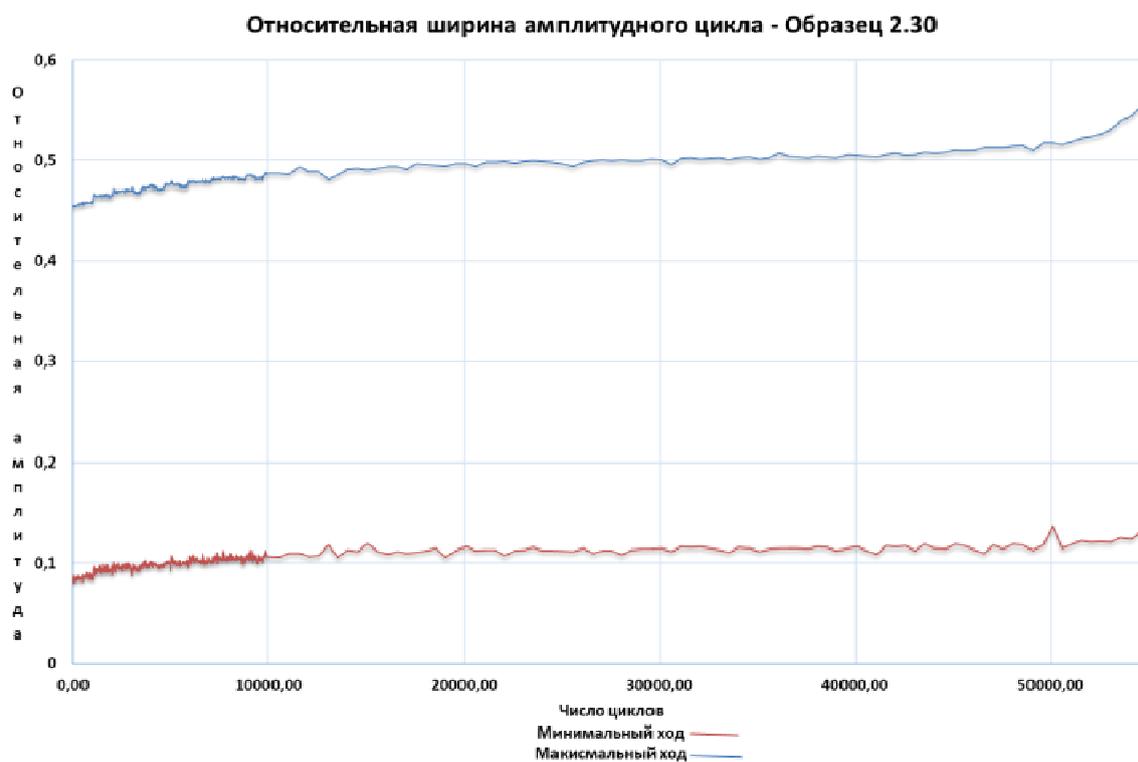


Рис. 7. Относительная ширина амплитудного цикла

Исходя из анализа полученных данных, можно говорить о ширине амплитудного цикла испытуемого образца и определить максимальное (200 МПа), среднее (109 Мпа) и минимальное (18 Мпа) напряжения.

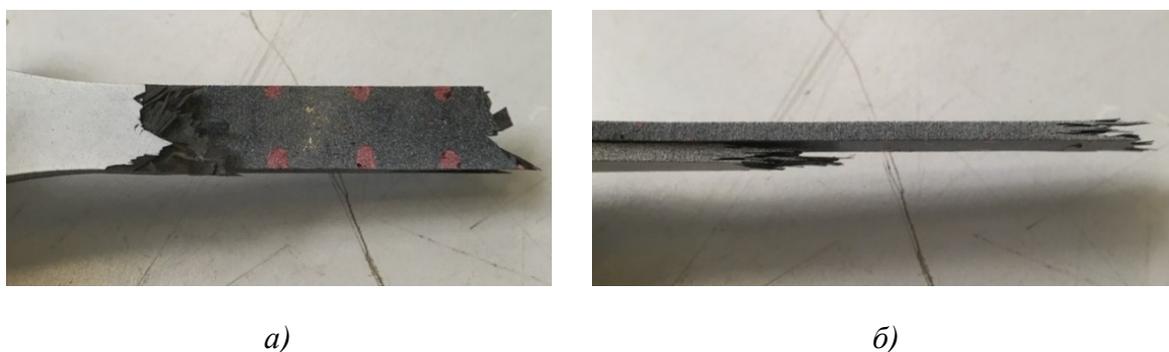


Рис. 8. Фотоснимки образца после циклических испытаний на усталость:
а — лицевая сторона; б — боковая сторона

Заключение

В результате испытаний физико-механических свойств, и последующем анализе, при помощи DIC, преимущество которого заключается в обзоре полномасштабных состояний образцов без использования оптических измерительных приборов (микроскоп), были получены не только физико-механические показатели образцов, но и возможность изучения структуры материала со всеми видами разрушения и деформаций, которые дают возможность прогнозирования модуля упругости при растяжении образцов ПКМ. Анализ циклических испытаний на усталость, позволяет изучить амплитудное движение напряжений с получением графических данных, и вычислить напряжения от минимального до максимального значения, в опытном материале исследования. При анализе стандартов, регламентирующих проведение испытаний ПКМ на растяжение и усталость было выявлено различие в геометрических размерах, подготавливаемых для исследования образцов, что может являться причиной расхождений в значениях характеристик, получаемых в результате испытаний, проводимых в соответствии с российскими и зарубежными стандартами.

Список литературы

1. Баурова, Н.И. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин / Н.И. Баурова, В.А. Зорин – М.: МАДИ, 2016. – 264 с.
2. ГОСТ Р 57921-2017. Композиты полимерные. Методы испытаний. Общие требования.
3. ГОСТ Р 57143-2016. Композиты полимерные. Метод испытания на усталость при циклических растяжениях.
4. ГОСТ Р 56785-2015. Композиты полимерные. Метод испытания на растяжение плоских образцов.
5. Петрова, А.П. Клеи, клеевые связующие и клеевые препреги: учебное пособие / А.П. Петрова, Г.В. Малышева; под общ. Ред. Каблова. – М.: ВИАМ, 2017. – 427 с.
6. ASTM D3039/D3039M-08. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials.
7. ASTM D3479/D3479 M-12. Standard test method for tension-tension fatigue of polymer matrix composite materials.

8. Stochastic laminate analogy for simulating the variability in modulus of discontinuous composite materials / P. Feraboli, T. Cleveland, M. Ciccu, P. Stickler, J. Halpin // Journal Elsevier Science, Composites. – Elsevier Ltd, 2010. – Part A. – P. 557.

9. Defect and damage analysis of advanced discontinuous carbon/epoxy composite materials / P. Feraboli, T. Cleveland, M. Ciccu, P. Stickler, L. Deoto // Journal Elsevier Science, Composites. – Elsevier Ltd, 2010. – Part A. – P. 888.

10. Kokcharov, I. Structural Integrity Analysis / I. Kokcharov, A. Burov // Amazon Digital Services LLC. – 2013. – 438 p.

11. Zorin, V.A. Analysis of the Influence of Quantum-Mechanical Processes on the Possibilities of Determining the Low Degree of Curing a Binder when Molding Products from Polymer Composite Materials / V.A. Zorin, N.I. Baurova, E.A. Kosenko // Polymer Science, Series D. – 2018. – Vol. 11, issue 3. – Pp. 334–338.

References

1. Baurova N.I., Zorin V.A. *Primenenie polimernykh kompozicionnykh materialov pri proizvodstve i remonte mashin* (The use of polymer composite materials in the production and repair of machines), Moscow, MADI, 2016, 264 p.

2. *Kompozity polimernye. Metody ispytaniy. Obshchie trebovaniya, GOST R 57921-2017* (Polymer composites. Test method. General requirements, State Standart 57921-2017).

3. *Kompozity polimernye. Metod ispytaniya na ustalost' pri ciklicheskih rastyazheniyah, GOST R 57143-2016* (Polymer composites. Test method for fatigue under cyclic tension, State Standart 57143-2016).

4. *Kompozity polimernye. Metod ispytaniya na rastyazhenie ploskih obrazcov, GOST R 56785-2015* (Polymer composites. Method of tensile testing of flat specimens, State Standart 56785-2015).

5. Petrova A.P., Malysheva G.V. *Klei, klevyye svyazuyushchie i klevyye prepregi* (Adhesives, adhesive binders and adhesive prepregs), Moscow, VIAM, 2017, 427 p.

6. ASTM D3039/D3039M-08, Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials.

7. ASTM D3479/D3479 M-12, Standard test method for tension-tension fatigue of polymer matrix composite materials.

8. Feraboli P., Cleveland T., Ciccu M., Stickler P., Halpin J. Stochastic laminate analogy for simulating the variability in modulus of discontinuous composite materials, Journal Elsevier Science, Composites, Elsevier Ltd, 2010, Part A, p. 557.

9. Feraboli P., Cleveland T., Ciccu M., Stickler P., Deoto L. Defect and damage analysis of advanced discontinuous carbon/epoxy composite materials, Journal Elsevier Science, Composites, Elsevier Ltd, 2010, Part A, p. 888.

10. Kokcharov I., Burov A. Structural Integrity Analysis, Amazon Digital Services LLC, 2013, 438 p.

11. Zorin V.A., Baurova N.I., Kosenko E.A. Analysis of the Influence of Quantum-Mechanical Processes on the Possibilities of Determining the Low Degree of Curing a Binder when Molding Products from Polymer Composite Materials, Polymer Science, Series D, 2018, vol. 11, issue 3, pp. 334–338.