

## Methods of experimental research of physical-mechanical properties of polymer composite materials

Gubsky D. (Russian Federation)

## Методы экспериментальных исследований физико-механических свойств полимерных композиционных материалов

Губский Д. В. (Российская Федерация)

Губский Дмитрий Витальевич / Gubsky Dmitry – магистр,  
кафедра измерительно-вычислительной техники,

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь

**Аннотация:** рассмотрены существующие экспериментальные методы механических испытаний полимерных волокнистых композиционных материалов. Проведен анализ сопоставимых отечественных (ГОСТ, ОСТ) и зарубежных (ASTM D) стандартных методов статических испытаний композитов, выявлены сходства и различия, указаны недостатки. На основе анализа научных литературных источников отечественных и зарубежных авторов, работы которых посвящены методическим вопросам, экспериментальными исследованиями закономерностей деформирования полимерных композиционных материалов при статическом нагружении, можно сделать вывод, что актуальным направлением исследований в экспериментальной механике является развитие научно обоснованных методик экспериментального исследования механических свойств полимерных волокнистых композиционных материалов.

**Abstract:** the existing experimental methods of mechanical testing of polymeric fibrous composite materials. The analysis of comparable domestic (GOST, OST) and foreign (ASTM D) standard methods of static tests of composites revealed similarities and differences, and the drawbacks. Based on the analysis of scientific literature of domestic and foreign authors whose works are devoted to methodological issues, experimental studies of the regularities of deformation of polymer composite materials under static loading, it can be concluded that the current areas of research in experimental mechanics is the development of scientific methods of experimental research of mechanical properties of polymer composite materials.

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы (ПКМ), композиционные материалы, экспериментальная механика, ГОСТ, ASTM, механические испытания, физико-механические свойства.

**Keywords:** polymer composite materials (PCM), composite materials, experimental mechanics, GOST, ASTM, mechanical testing, physical and mechanical properties.

Современному состоянию экспериментальных исследований физико-механических свойств материала уделено внимание в работах С. Алтури, Ф. Эрдоган, А. Кобаяси, Ф. Дж. Белла, В. Э. Вильдемана и др. [1, 2, 3 и др.]. Методические вопросы экспериментальной механики материалов отражены в работах следующих авторов Я. В. Фридман, И. М. Керштейна, Е. В. Ломакина, Э. Беккера, И. Кестера, Г. Фрейера, Б.Д. Аннина, В. М. Жигалкина, А.С. Вольмира, А. А. Лебедева, Ф. С. Савицкого, А. И. Станкевича, А. М. Локощенко, Р. А. Васина, Б. В. Букетина, А. А. Горбатовского, И. Д. Кисенко, А. Дюрелли, Дж. Холла, Ф. Стерна и др. [4, 5, 6, 7, 8, 9, и др.].

Актуальными задачами при проектировании изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) являются: развитие методов испытаний для определения их механических и химических свойств, получение достоверных экспериментальных данных о характеристиках материала в исходном состоянии и снижении их в процессе длительной эксплуатации, разработка новых способов обработки экспериментальных данных с целью повышения точности, снижения стоимости и сроков испытаний, а также развитие методик расчета несущей способности конструкций из ПКМ на основе оптимизации технико-экономических показателей и экспериментально проверенных свойств материалов.

Испытания волокнистых композиционных материалов характеризуются рядом особенностей и отличаются от металлов различными типами разрушения при нагружении в идентичных условиях. Анизотропия и неоднородность волокнистых композитов, а также практически полное отсутствие пластических деформаций в углепластике при всех возможных видах разрушения обуславливают значительные трудности при получении объективных характеристик даже при одноосном нагружении [10, 11, 12, 13]. Поэтому обоснование выбора образца часто требует больших усилий, чем проектирование конструктивного элемента из композита.

Наиболее актуальными и применяемыми на практике методами определения механических свойств полимерных волокнистых композитов являются испытания на одноосное растяжение, сжатие, изгиб и сдвиг [14, 15].

Одним из самых распространенных методов испытаний ПКМ являются испытания на растяжение. Полученные физико-механические характеристики материала при одноосном растяжении образца, служат для оценки несущей способности материала. Сущность метода состоит в кратковременном испытании образцов из композита на растяжение с постоянной скоростью деформирования, при котором определяют: предел прочности при растяжении, предел пропорциональности, относительное удлинение, модуль упругости и коэффициент Пуансона. Отечественный метод механических испытаний на растяжение ПКМ ГОСТ 25.601-80, зарубежным методом испытаний является ASTM D3039/3039M [16]. Зарубежный стандарт более точно определяет методологию проведения испытания, разграниченный подход к геометрии образца, описаны большинство типов разрушения образца во время проведения испытания, таблица типа разрушения. В стандарте ASTM регламентируются размеры образцов в зависимости от направления оси армирования, либо от укладки слоев. При испытании однонаправленных композитов существует проблема, основанная на закреплении образцов и обеспечение разрушения в рабочей части образца. Это объясняется тем, что при повышенном проценте наполнения волокном материал обладает высокой прочностью в продольном направлении и значительно меньшей прочностью в поперечном направлении. Данной проблеме посвящены работы [17, 18 и др.].

Для определения кратковременных свойств полимерных композиционных материалов при сжатии могут быть использованы отечественные и зарубежные стандарты.

ГОСТ 25.602 – 80. Сущность метода состоит в кратковременном испытании образцов из композиционного материала на сжатие с постоянной скоростью деформирования, при которой определяют: предел прочности при сжатии (напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образца), модуль упругости при сжатии (отношение напряжения к соответствующей относительной деформации при сжатии образца в пределах начального линейного участка диаграммы деформирования), коэффициент Пуансона (отношение поперечного относительного удлинения к продольному относительному укорочению образца при сжатии в пределах начального линейного участка диаграммы деформирования) [19].

ASTM D 3410/D 3410M-08 [20], аналогичный ГОСТ 25.602 – 80 по методологии, но отличающийся рекомендованной оснасткой – усилие сжатия в образце осуществляется приложением сдвиговой нагрузки с помощью самозатягивающихся клиновых захватов. Для получения результатов испытания образец вставляется в испытательную оснастку, которая устанавливается между плитами испытательной установки и на которую действует усилие сжатия. Предельное напряжение сжатия материала, создаваемое на такой испытательной оснастке и на образце, можно получить из максимального усилия разрушения. Величина деформации постоянно контролируется тензорезисторами или датчиками перемещений. Таким образом, можно определить и вывести значения предельной деформации сжатия, модуля упругости при сжатии и коэффициента Пуансона.

ОСТ 92-1460-77 [21]. Стандарт распространяется на пластмассы теплозащитного и конструкционного назначения. Стандарт устанавливает требования к методу статических испытаний на сжатие с определением прочностных характеристик, при температурах от минус 60 до плюс 500°C и деформационных при  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  и действует совместно с ОСТ 92-1458-77. Сущность метода заключается в приложении к образцу постоянно увеличивающейся сжимающей нагрузки при постоянной температуре и постоянной скорости движения тавреры испытательной машины до его разрушения с определением максимального и разрушающего напряжения при сжатии и относительной деформации сжатия при разрушении.

Испытания композитов на сдвиг может быть осуществлено различными способами, например испытания на межслоевой сдвиг методом короткой балки. У метода испытаний на межслоевой сдвиг методом короткой балки есть много плюсов и минусов. Образец изгибают посредством трёхточечного нагружения. Сдвиговое напряжение, создаваемое при этом в балке, прямо пропорционально величине прикладываемой нагрузки и не зависит от длины пролёта. Напряжения изгиба прямо пропорциональны и прикладываемой нагрузке, и длине пролёта. Таким образом, пролёт между опорами у образца (короткой балки) для испытаний на сдвиг делают небольшим в расчёте на то, что разрушение от межслоевого сдвига произойдёт раньше, чем разрушение от изгиба. Данный метод испытаний регламентирован стандартом ASTM D 2344 [22], который устанавливает, что для высокомодульных композитов отношение расстояния между опорами к толщине образца должно составлять  $L/h = 4$ . Данный вид испытаний так же стандартизирован в ОСТ 92-1472-78, он распространяется на жесткие слоистые пластмассы, слоистые и слоисто-прошивные углерод-углеродные материалы теплозащитного и конструкционного назначения.

Испытания ПКМ при изгибе наиболее дешевы и доступны, но возникающее при изгибе НДС является неоднородным, регистрируемые показатели интегрально содержат информацию о растяжении, сжатии и межслоевом сдвиге. Механические показатели ПКМ, определяемые при изгибе на этапе разработки материала: разрушающее напряжение при поперечном изгибе, модуль упругости при поперечном изгибе. Достаточно приемлемым стандартом при этом виде испытаний является ГОСТ 25.604-82 [23]. Он

распространяется на ПКМ, армированные непрерывными высокомолекулярными углеродными, борными, органическими и другими волокнами, структура которых симметрична относительно их срединной плоскости. Испытания этих материалов на изгиб проводятся при нормальной (20°C), повышенной (до +180°C) и пониженной (до - 60°C) температурах. Метод испытания на изгиб стеклопластиков установлен ранее в ГОСТ 4648-71 [24]. Зарубежными технически неидентичными аналогами являются ASTM D 7264/D7264M-07 [25] и ASTM D 790 [26].

Несмотря на большой объем получаемой информации, испытания на изгиб часто считаются второстепенными и их результаты многие авторы не рекомендуют использовать при расчете конструкций из армированных пластиков. Причин недоверия к такому методу определения механических характеристик композитов несколько: ограниченные возможности корректной обработки результатов испытаний, особенности испытываемых материалов и неоднородное напряженное состояние при изгибе.

Все существенные программы испытаний должны начинаться с документальной подготовки подробного плана испытаний. В плане испытаний указываются свойства материала, которые будут оцениваться, выбираются методы испытаний, отсеиваются варианты, предлагаемые в стандартных методах испытаний, путем отбора специфических параметров опытного образца и испытаний.

Перед составлением программы испытаний важно изучить существующие методы определения характеристик, оценить их актуальность, корректность, легитимность и экономическую эффективность.

Основные особенности механических испытаний ортотропных конструкционных ПКМ с непрерывными волокнами по сравнению с испытаниями изотропных металлических материалов состоят в следующем:

- существенное влияние состава компонентов, технологической истории и структуры материала на его характеристики требует испытания достаточно больших партий образцов для статистического анализа экспериментальных данных;
- необходимо оценивать механические показатели в направлениях разных осей анизотропии;
- необходимо выполнять процедуры кондиционирования образцов в стандартных условиях;
- предел прочности при сжатии часто ниже, чем прочность при растяжении (хотя некоторые ПКМ могут вести себя противоположным образом), что приводит к необходимости испытывать материал в условиях сжатия и растяжения с измерением продольных и поперечных деформаций для каждой регламентированной ориентации осей анизотропии;
- структура приповерхностных слоев композита приводит к более существенной неоднородности поля деформаций на поверхности образца, что дает большой статистический разброс измеряемых деформаций при использовании малобазных тензорезисторов;
- рабочие температуры сравнительно близки к температурам фазовых переходов полимерного связующего (по сравнению с металлами);
- повышенная чувствительность образцов ПКМ к анизотропии прочностных показателей часто приводит к разрушению образцов не в зоне однородного НДС, а в зонах сложного напряженного состояния, формируемого контактирующими с образцом деталями испытательной оснастки.

Одним из критериев метода испытания является теоретическая способность выполненного испытания привести к желаемому результату, такому, как однородное линейное напряженное состояние в ходе всего испытания. Однако вышеупомянутые факторы имеют тенденцию увеличивать чувствительность композиционных материалов к более широкой гамме испытательных параметров, чем это отмечено в случае с обычными материалами. Поэтому устойчивость метода испытаний, или относительная невосприимчивость к незначительным изменениям опытного образца и процедуры испытаний, столь же важна, как и теоретическое совершенство метода [27].

Большинство ГОСТов были разработаны для полимерных изотропных материалов. Существует также ряд стандартов для ПКМ (испытания на растяжение, сжатие, сдвиг и изгиб). Однако существующие стандарты не позволяют в полной мере определить весь диапазон характеристик материалов, необходимых при проектировании изделия, а испытание ПКМ согласно некоторым стандартам для полимеров является некорректным. Зарубежные стандарты разработаны специально для композитов и позволяют определить практически все необходимые параметры.

Отечественные стандарты (ГОСТы), в отличие от зарубежных (например, ASTM), недостаточно точно регламентируют методологию испытаний, что может приводить к существенной разнице испытаний, проводимых различными исполнителями. Например, зачастую ГОСТами не регламентированы схема армирования, взаимная ориентация осей материала и направление нагрузки; статистическая обработка результатов эксперимента проводится в объеме существенно меньшим, чем за рубежом или отсутствует совсем; а для определения характеристик материала при действии каждого вида нагрузок необходимо использовать несколько стандартов.

### *Литература*

1. Эрдоган Ф., Кобаяси А., Алтури С. Вычислительные методы в механике разрушения. М.: Мир, 1990. 392 с.
2. Вильдеман В. Э., Третьяков М. П., Третьякова Т. В., Бульбович Р. В., Словиков С. В., Бабушкин А. В., Ильиных А. В., Лобанов Д. С., Ипатова А. В. Экспериментальные исследования свойств материалов при сложных термомеханических воздействиях / Под ред. В. Э. Вильдемана. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 204 с. ISBN 978-5-9221-1374-8.
3. Экспериментальная механика: В 2-х книгах: Книга 1. Пер. с англ. / Под ред. А. Кобаяси. М., Мир, 1990. 552 с.
4. Аннин Б. Д., Жигалкин В. М. Поведение материалов в условиях сложного нагружения. Новосибирск: Издательство СО РАН, 1999. 342 с.
5. Букеткин Б. В., Горбатовский А. А., Кисенко И. Д. Экспериментальная механика. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 136 с.
6. Вольмир А. С., Григорьевич Ю. П., Марьин В. А., Станкевич А. И. Сопротивление материалов. Лабораторный практикум: Учеб. Пособие для вузов. 2-е изд., испр. М.: Дрофа, 2004. 352 с.
7. Керштейн И. М., Клоушиков В. Д., Ломакин Е. В., Шестериков С. А. Основы экспериментальной механики разрушения. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1989. 140 с.
8. Савицкий Ф. С., Вандышев Б. А. Жёсткость испытательных машин и ее влияние на ниспадающий участок диаграммы растяжения и изгиба // Завод-лаборатория, 1956. Т. 22. № 6. С. 717–721.
9. Фридман Я. Б. Оценка опасности разрушения машиностроительных материалов // Теоретические основы конструирования машин. М.: Гос. научн.-тех. изд-во машиностр. лит-ры, 1957. С. 257–281.
10. Стрижало В. А., Земцов В. П. Жесткость и прочность слоистых углепластиков при одноосномнагружении // Проблемы прочности, 2011. № 6. С. 61 – 71.
11. Dumansky A. M., Tairova L. P. The prediction of viscoelastic properties of layered composites on example of cross ply carbon reinforced plastic // World Congress on Engineering 2007. V. II. London, UK 2–4 July, 2007. P. 1346–1351.
12. Коваленко Н. А. Численно-экспериментальное исследование прочности элементов конструкций из слоистых углепластиков // Обработка металлов, 2014. №1 (62). С. 69 – 75.
13. Dumansky A. M., Tairova L. P. Construction of hereditary constitutive equations of composite laminates // Proceedings of the Second International Conference on Heterogeneous Material Mechanics “Advances in heterogeneous Material Mechanics”. June 3–8, Huanshan, China. DEStech Publications, Inc., 2008. P. 934–937.
14. Witney J. M., Nuismer R. J. Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentrations // Journal of Composite Materials., 1974. Vol. 8, pp. 253–265.
15. Беспалов В. А., Гоцелюк Т. Б. Исследование критериев разрушения элементов из КМ в зонах концентрации напряжений при сжатии: отчет по НИР № 14–12. Новосибирск: СибНИА, 2012. 104 с.
16. ASTM D 3039/D 3039M-08. Standard Test Method for Polymer Matrix Composite Materials. 13 p.
17. Лавров А. В., Смирнова М. К. Некоторые особенности определения прочности при сжатии КМ с однонаправленным армированием // Механика композитных материалов, 1989. № 4. С. 631-634.
18. Лобанов Д. С., Вильдеман В. Э., Бабушкин А. В. Прочность и механизмы разрушения полимерных волокнистых композиционных материалов при испытаниях на одноосное растяжение, сжатие и изгиб в условиях термомеханических воздействий // VI-я Евразийская научно-практическая конференция Прочность неоднородных структур. г. Москва, 17-19 апреля 2012г.: тезисы докладов. Москва: НИТУ «МИСиС», 2012. С. 94.
19. ГОСТ 25.602 – 80. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на сжатие при нормальной, повышенной пониженной температурах [Текст]. Москва: Стандартинформ, 2005. 14 с.
20. ASTM D 3410/D 3410M-08. Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading. 16 p.
21. ОСТ 92-1460-77. Пластмассы теплозащитного и конструкционного назначения. Метод испытания на сжатие. [Текст]. Москва: Стандартинформ, 2012. 19 с.
22. ASTM D 2344/ D 2344M-00E01. Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates. 15 p.
23. ГОСТ 25.604-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на изгиб при нормальной, повышенной пониженной температурах [Текст]. Москва: Стандартинформ, 2005. 17 с.
24. ГОСТ 4648-71. Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб [Текст]. Москва: Издательство Стандартов, 1992. 12 с.
25. ASTM D 7264/D7264M-07. Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials. 11 p.

26. ASTM D 790 – 07. Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical insulating materials. 11 p.
27. *Лантев М. Ю., Адамов А. А.* Сравнение методик определения упругих и прочностных характеристик полимерных композиционных материалов при разных видах нагружения // Вычислительная механика сплошных сред, 2015. № 2. С. 244 – 262.