

УДК 677.024.1
DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_271

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
УГЛЕРОДНОЙ НИТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕЕ ОРИЕНТАЦИИ
В КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ**

**EXPERIMENTAL STUDIES OF THE MECHANICAL PROPERTIES
OF A CARBON FILAMENT DEPENDING ON ITS ORIENTATION
IN A COMPOSITE MATERIAL**

М.В. КИСЕЛЕВ, А.Б. БАЛАШОВ, С.Е. ГОЛУБЕВ

M.V. KISELEV, A.B. BALASHOV, S.E. GOLUBEV

(ООО НПО "Программируемые Композиты", Россия)

(ООО NPO "Programmable Composites" LLC, Kostroma, Russia)

E-mail: kisselev50@mail.ru; balashovandrej@yandex.ru; golubev007@mail.ru

Статья посвящена экспериментальному исследованию механических характеристик углеродных нитей в композиционных материалах в зависимости от угла ее ориентации в композите по отношению к направлению вектора действующей силы при трех напряженно-деформируемых состояниях

– растяжения, сжатия и сдвига. Полученные механические характеристики углеродной нити необходимы для формирования исходных данных для CAE расчетов при выборе модели поведения композиционного материала как ортотропного тела. Определены критерии прочности для углеродной нити в композите в зависимости от угла между осью нити и вектором действия внешней силы, согласно феноменологической теории прочности. Разработана методика определения механических свойств одиночной нити в композиционном материале на основе теории совместной деформации. Обосновано применение безутковых препрегов для решения поставленной задачи. Выполнены серии экспериментальных испытаний конкретного углеродного препрега при деформациях сжатия, растяжения и сдвига. Выполнена статистическая обработка полученных результатов, получена высокая достоверная вероятность данных. Получены аппроксимирующие зависимости механических характеристик углеродной нити от угла между осью нити и вектором действия внешней силы.

The article is devoted to the experimental study of the mechanical characteristics of carbon filaments in composite materials depending on its orientation angle in the composite with respect to the direction of the acting force vector under three stress-strain states – stretching, compression and shear. The obtained mechanical characteristics of the carbon filament are necessary for the formation of initial data for CAE calculations when choosing a model of a composite material behavior as an orthotropic body. The strength criteria for a carbon filament in a composite are determined depending on the angle between the axis of the filament and the vector of an external force action, according to the phenomenological theory of strength. A technique for determining the mechanical properties of a single thread in a composite material based on the theory of joint deformation has been developed. The use of non-track prepregs to solve the problem is justified. A series of experimental tests of a specific carbon prepreg under compression, tension and shear deformations have been performed. Statistical processing of the obtained results was performed, a high confidence probability of the data was obtained. Approximating dependences of the mechanical characteristics of the carbon filament on the angle between the axis of the filament and the vector of an external force action are obtained.

Ключевые слова: свойства композиционных материалов, 3D-ткачество, углеродная нить, критерии прочности.

Keywords: properties of composite materials, 3D weaving, carbon thread, strength criteria.

Актуальность проектирования композиционных материалов (КМ) с заданными Заказчиком эксплуатационными свойствами сегодня не вызывает сомнений. Наиболее перспективным решением данной задачи является современное направление построения цифровых двойников изделий и выполнение их виртуальных испытаний с целью минимизации затрат и сокращения сроков на разработку новых КМ. Одним из самых сложных этапов построения цифро-

вого двойника изделия является выполнение CAE расчетов КМ и прогнозирование их свойств [1]. В свою очередь, выполнение CAE расчетов невозможно без знания физико-механических свойств всех материалов, входящих в состав композита. Для полимерных КМ свойства связующего не представляют существенных сложностей, поскольку его поведение, как правило, описывается как поведение изотропного мате-

риала с известными свойствами от производителя. Сложность в определении свойств КМ представляет углеродная нить, которая в пропитанном виде в КМ имеет совершенно другие свойства, чем в исходном сухом состоянии. Кроме того, известна существенная зависимость механических свойств углеродной нити от угла между осью нити и вектором действия внешней силы [2]. Это говорит о том, что свойства КМ будут не только анизотропны по всем координатным осям, но и существенно различны по областям материала в зависимости от ориентации нити в пространстве композита. Игнорирование факта существенной зависимости свойств композита от ориентации нити в композите приведет к значительным погрешностям при определении несущей способности композитной детали. Особенно это актуально для композитов на основе технологии 3D-ткачества [3], [4], поскольку в них углеродная нить наиболее сложно ориентирована по всему объему композита. Изучение поведения углеродной нити в КМ позволит в перспективе целенаправленно формировать текстильную структуру преформы для повышения механических свойств готового изделия.

Данная статья посвящена исследованию зависимости механических характеристик углеродной нити в зависимости от угла между осью нити и вектором действия внешней силы. Модель поведения углеродной нити в композите выбрана как модель ортотропного тела. В связи с этим все испытания углеродной нити выполнены для деформаций растяжения, сжатия и сдвига. Для определения критериев прочности углеродной нити в композите использована феноменологическая теория прочности. Более подробный анализ критериев разрушения дан в источниках [5...9].

Для получения КМ и выполнения исследований выбран безутковый препрег углеродный 230 0/NF E320 39% от фирмы SGL Carbon SE. Технические характеристики представлены в [10]. Выбор данного материала обоснован машинным способом получения образцов и гарантированной 100%-ной пропиткой связующим, что обеспечивает достоверность получаемых ре-

зультатов. Для отверждения препрегов и создания давления при застывании полимерной смолы использовался прибор VU220DGT. Данное устройство имеет плоский столик, возможность прессования образца и регулируемый нагрев до 180°C.

Для расчета механических характеристик углеродной нити в КМ разработана методика, основанная на теории совместной деформации при испытаниях плоских образцов КМ. Испытания КМ выполнялись по ГОСТ Р 56785-2015 "Композиты полимерные. Метод испытания на растяжение плоских образцов", ГОСТ Р 568122015 "Композиты полимерные. Метод определения механических характеристик при комбинированной сжимающей нагрузке", ГОСТ Р 572072016 "Композиты полимерные. Определение характеристик при сдвиге методом перекашивания образцов с V-образным вырезом". Графическое представление исходных данных для расчета свойств углеродной нити в композиционном материале, в зависимости от схемы нагружения образца, представлено на рис. 1.

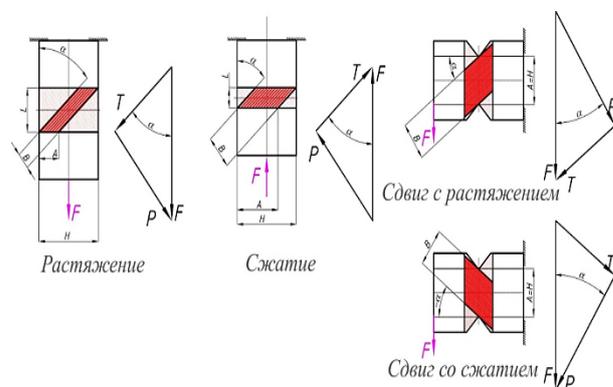


Рис. 1

Расчет напряжений для образцов из препрегов. Обозначения и размерности: F – нагрузка образец, Н; T – нагрузка вдоль волокон образца, Н; P – нагрузка поперек волокон образца, Н; α – угол наклона волокон в образце, град.; H – ширина образца, мм; A – ширина рабочей зоны образца, мм; L – длина рабочей зоны образца, мм; B – ширина полоски волокон в рабочей зоне образца, мм; δ – толщина образца, мм; k – коэффициент заполнения образца волокном

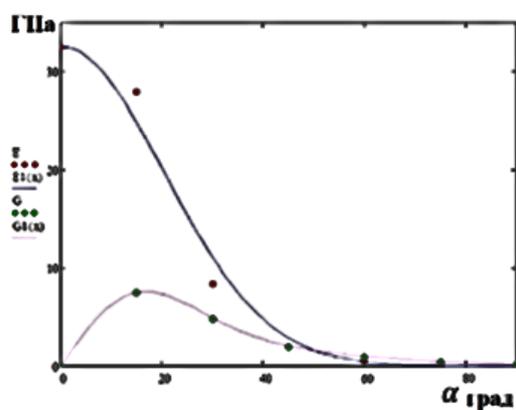
($k=0,84$); Δ – абсолютная деформация образца (в направлении силы F), мм; ε – относительная деформация образца (в направлении силы F), %; σ – нормальное (по отношению к нитям) напряжение, МПа; τ – касательное (по отношению к нитям) напряжение, МПа; E – модуль упругости нитей 1-го

рода; G – модуль упругости нитей 2-го рода.

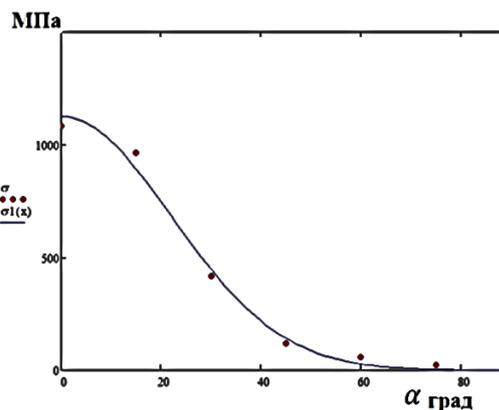
Расчетные зависимости, использованные для определения механических свойств углеродной нити в композиционном материале, представлены в табл. 1.

Таблица 1

	Для растяжения и сжатия	Для сдвига
Связующее	$\sigma_{90} = \frac{F_{90}}{H\delta}$	$\tau_{90} = \frac{F_{90}}{H\delta} = \frac{F_{90}}{A\delta}$
	$\varepsilon_{90} = \frac{\Delta_{90}}{L}$	$\varepsilon_{90} = \frac{\Delta_{90}}{H} = \frac{\Delta_{90}}{A}$
	$E_{90} = \frac{\sigma_{90}}{\varepsilon_{90}} = \frac{LF_{90}}{H\delta\Delta_{90}}$	$G_{90} = \frac{\tau_{90}}{\varepsilon_{90}} = \frac{F_{90}}{\delta\Delta_{90}}$
В направлениях нагрузений	$T = F \cos \alpha$	$T = F \sin \alpha$
	$P = F \sin \alpha$	$P = F \cos \alpha$
	$A = H - L \operatorname{tg} \alpha$	$A = H$
	$B = A \cos \alpha$	
	$\sigma_{\alpha} = \frac{T}{B\delta k}$	
	$\tau_{\alpha} = \frac{P}{B\delta k}$	
	$\varepsilon = \frac{\Delta}{L}$	$\varepsilon = \frac{\Delta}{A} = \frac{\Delta}{H}$
$E_{\alpha} = \frac{\sigma_{\alpha}}{\varepsilon} = \frac{T}{\varepsilon B\delta k}$		
$G_{\alpha} = \frac{\tau_{\alpha}}{\varepsilon} = \frac{P}{\varepsilon B\delta k}$		
По волокнам	$F = \varepsilon\delta \left[\frac{EAk}{\cos \alpha} + E_{90}(H - Ak) \right]$	$F = \varepsilon\delta A \left[\frac{Gk}{\cos \alpha} + G_{90}(1 - k) \right]$
	$E = \frac{F}{\varepsilon\delta} - E_{90}(H - Ak) \cos \alpha$	$G = \frac{F}{\varepsilon\delta A} - G_{90}(1 - k) \cos \alpha $
	$\sigma = \frac{E\varepsilon}{\cos \alpha}$	$\tau = \frac{G\varepsilon}{\cos \alpha}$
	$\tau = \sigma \operatorname{tg} \alpha$	$\sigma = \tau \operatorname{tg} \alpha$



а)



б)

Рис. 2

Индекс при параметрах соответствует углу наклона волокон по отношению к силе F . Соответственно параметры с индексом 90 характеризуют связующее. Результаты механических характеристик углеродной нити от ее угла наклона в композите при деформации сжатия, растяжения и сдвига представлены на рис. 2 (результаты аппроксимации экспериментальных данных: а) зависимость модулей упругости 1 и 2-го рода при сжатии от угла наклона нити в композите, б) зависимость предела прочности нити при сжатии от угла наклона в композите), рис. 3 (результаты аппроксимации

экспериментальных данных: а) зависимость модулей упругости 1 и 2-го рода при растяжении от угла наклона нити в композите, б) зависимость предела прочности нити при растяжении от угла наклона в композите) и рис. 4 (результаты аппроксимации экспериментальных данных: а) зависимость модулей упругости 1 и 2-го рода при сдвиге от угла наклона нити в композите, б) зависимость предела прочности нити при сдвиге от угла наклона в композите) соответственно. На них же представлены результаты аппроксимации полученных экспериментальных данных различными уравнениями регрессии.

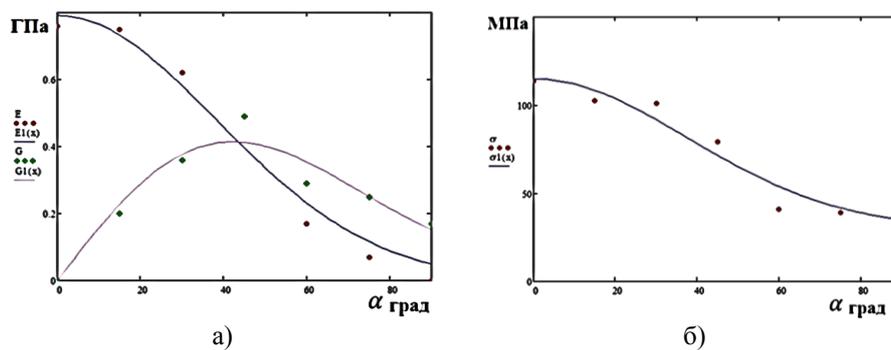


Рис. 3

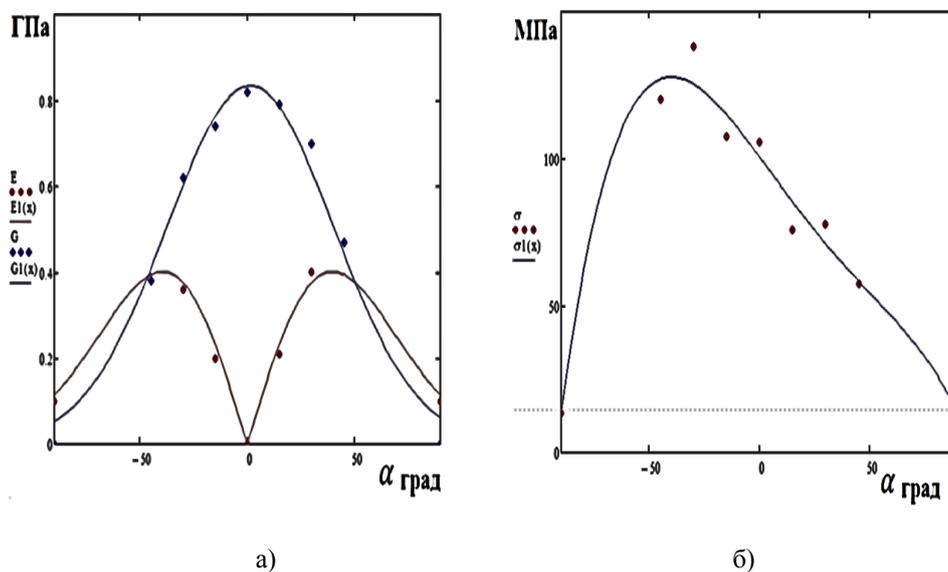


Рис. 4

Для аппроксимации модуля упругости 1-го рода и предела прочности при растяжении и сжатии, а также модуля упругости 2-го рода при сдвиге выбрано показательное уравнение:

$$y = a \left(\frac{b}{c} \right)^{-x^2} \quad (1)$$

Аппроксимация модуля упругости 2-го рода при растяжении и сжатии, а также для

модуля упругости 1-го рода при сдвиге выполнена первой производной показательного уравнения с приведением уравнения к знаку абсолютной величины:

$$y = \frac{a|x| \ln(b)}{b^{x^2}}. \quad (2)$$

Аппроксимация предела прочности при сдвиге выполнена с использованием полинома 4 степени:

$$y = a_1x^4 + a_2x^3 + a_3x^2 + a_4x + a_5. \quad (3)$$

В результате оценки достоверности результатов испытаний доверительная погрешность для процесса растяжения 4,48%, для сжатия 9,06%, для сдвига 20,96%. Наибольший коэффициент вариации данных получен при сдвиге, который оче-

видно, объясняется более сложными схемами описания поведения композиционного материала при сложных видах деформации, связанных с нелинейным поведением материала, и описание его с помощью линейных зависимостей схематизации диаграмм деформирования дает существенные погрешности.

Обработка результатов с использованием многофакторного корреляционно-регрессионного анализа позволила определить тесноту связей исследуемых величин при различных видах деформации. Для анализа использовалась модель с числом факторов 7 при растяжении и числом факторов 6 при сжатии и сдвиге. Для этого исследовалось влияние каждого из них в отдельности, а также совокупное их воздействие на моделируемый показатель Y . Набор исследуемых величин представлен в табл. 2.

Таблица 2

Процесс	Модуль Юнга	Разрывная нагрузка	Абсолютная деформация	Площадь сечения	$\sin(\alpha)$	$\cos(\alpha)$	Относительная деформация	Длина рабочей зоны
	Е, ГПа	F, Н	Δ , мм	S, м ²			ε , %/100	L, мм
Растяжение	Y	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
Сжатие	Y	X1	X2	X3	X4	X5	X6	-
Сдвиг	Y	X1	X2	X3	X4	X5	X6	-

Статистическая значимость общего качества уравнения множественной регрессии проверена с помощью коэффициента детерминации и критерия Фишера. Поскольку фактическое значение $F > F_{кр}$ (см. табл. 3), то коэффициент детерминации статистически значим и уравнения регрессии статистически надежны для растяжения, сжатия и сдвига.

Статистическая значимость влияния исследуемых факторов $X_1 \dots X_7$ на моделируемый показатель Y для растяжения, сжатия и сдвига представлена на рис. 5.

В исследуемой факторной модели установлено, что совокупное воздействие ис-

следуемых факторов на моделируемый показатель Y общей вариабельности объясняется изменением факторов X_i для растяжения 99,97%, для сжатия 98,65%, для сдвига 78,03%. Статистической процент качества уравнения регрессии проведенного исследования для растяжения и сжатия подтверждает высокой уровень достоверности полученных результатов, так как значение коэффициента детерминации близко к 1. При проведении исследований на сдвиг качество моделирования показателя Y общей вариабельности снижается до 78,03%.

Таблица 3

Критерий Фишера модели F	4194,709	170,62	178,37
Критерий Фишера табличный	3.14	2.85	3.09

Статистическая значимость влияния исследуемых факторов $X_1 \dots X_7$ на моделируемый показатель Y для растяжения, сжатия и сдвига представлена на рис. 5.

В исследуемой факторной модели установлено, что совокупное воздействие исследуемых факторов на моделируемый показатель Y общей вариабельности объясняется изменением факторов X_i для растяжения 99,97%, для сжатия 98,65%, для сдвига

78,03%. Статистической процент качества уравнения регрессии проведенного исследования для растяжения и сжатия подтверждает высокой уровень достоверности полученных результатов, так как значение коэффициента детерминации близко к 1. При проведении исследований на сдвиг качество моделирования показателя Y общей вариабельности снижается до 78,03%.

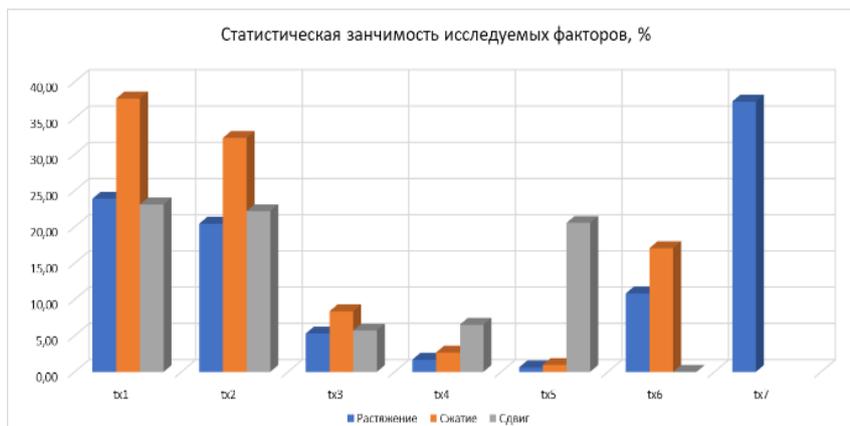


Рис. 5

Сравнение полученных экспериментальных данных с данными зарубежных исследователей [2] показывает хорошее качественное совпадение результатов, однако приведенные в статье результаты включают в себя и исследование деформации сдвига.

Выполненные экспериментальные исследования дают представление о влиянии угла наклона углеродной нити на ее диаграмму деформирования при различных видах напряженно-деформируемого состояния (НДС). Таким образом можно экспериментально определить самую важную характеристику углеродного волокна – предел прочности при различной его ориентации в композиционном материале при различных НДС, что дает возможность выполнять расчеты в САЕ системах заданием соответствующих свойств или прогнозировать свойства композиционных материалов с использованием правила смеси методом гомогенизации.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика определения свойств углеродной нити от ее положения в композиционном материале.
2. Разработанная методика реализована на конкретном композиционном материале. Получены статистически достоверные регрессионные модели зависимости механических характеристик углеродного волокна в зависимости от угла между осью нити и вектором действия внешней силы.
3. Полученные регрессионные зависимости могут быть использованы для последующего расчета КМ в САЕ системах и целенаправленно формировать текстильную структуру преформы для повышения механических свойств готового изделия.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Guenther Lutz*. The puck theory of failure in laminates in the context of the new guideline [Electronic resource] - 2014. // Access mode - <https://ru.scribd.com/document/346180392/VDI-PART-3-The-Puck-theory-of-failure-in-laminates-in-the-context-of-the-new-guideline-pdf>. Access date 21.05.2021.

2. Daniel I.M. Engineering mechanics of composite materials. – New York, - 2006.

3. Behera B.K., Ishai O., Mishra R. 3-dimensional weaving // Indian journal of fibre & textile research. – №33, 2008. P. 274...287.

4. Tian W., Zhu C., Shanghai S.W. Geometric model of three dimensional integrated cellular woven structures // College of Textiles. Dong Hua University. – P.23...27.

5. Орешико Е.И., Ерасов В.С., Гриневич Д.В. Обзор критериев прочности материалов [Мультимедиа] // Труды ВИАМ. – М.: ФГУП "ВИАМ" ГНЦ РФ, 2019, №9 (81). С. 108...126.

6. Муїземнек А.Ю., Карташова Е.Д. Механика деформирования и разрушения полимерных слоистых композиционных материалов. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2017.

7. Гришин В.И., Дзюба А.С., Дударьков Ю.И. Прочность и устойчивость элементов и соединений авиационных конструкций из композитов. – М.: Изд-во физ.-матем. лит., 2013.

8. Фудзии Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов / Пер. с японск. – М.: Мир, 1982.

9. Скворцов Ю.В. Механика композиционных материалов. – Самара, 2013.

10. Компания ООО "Комфайбер Про": офиц. сайт [Электронный ресурс]. - Режим доступа: www.carbon-info.ru

REFERENCES

1. Guenther Lutz. The puck theory of failure in laminates in the context of the new guideline [Electronic resource] - 2014. // Access mode - <https://ru.scribd.com/document/346180392/VDI-PART-3-The-Puck-theory-of-failure-in-laminates-in-the-context-of-the-new-guideline-pdf>. Access date 05/21/2021.

2. Daniel I.M. Engineering mechanics of composite materials. – New York, - 2006.

3. Behera V.K., Ishai O., Mishra R. 3-dimensional weaving // Indian journal of fiber & textile research. - No. 33, 2008. P. 274 ... 287.

4. Tian W., Zhu C., Shanghai S.W. Geometric model of three dimensional integrated cellular woven structures // College of Textiles. Donghua University. – P.23...27.

5. Oreshko E.I., Erasov V.S., Grinevich D.V. Review of criteria for the strength of materials [Multimedia] // Proceedings of VIAM. - M.: FSUE "VIAM" State Scientific Center of the Russian Federation, 2019, No. 9 (81). pp. 108...126.

6. Muizemnek A.Yu., Kartashova E.D. Mechanics of Deformation and Fracture of Polymer Layered Composite Materials. - Penza: Publishing House of PGU, 2017.

7. Grishin V.I., Dzyuba A.S., Dudarkov Yu.I. Strength and stability of elements and joints of aircraft structures made of composites. – М.: Publishing House of Phys.-Math. lit., 2013.

8. Fujii T., Dzako M. Fracture mechanics of composite materials / Per. from Japanese – М.: Mir, 1982.

9. Skvortsov Yu.V. Mechanics of composite materials. – Samara, 2013.

10. LLC "Comfiber Pro": official. site [Electronic resource]. - Access mode: www.carbon-info.ru

Рекомендована заседанием научно-технического совета ООО НПО "ПК". Поступила 28.12.21.