

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОТКЛОНЕНИЙ РАСПОЛОЖЕНИЯ АРМИРУЮЩЕГО В ПОЛИМЕРНОМ СЛОИСТОМ КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЮ И РАЗРУШЕНИЮ

Аннотация.

Актуальность и цели. Одним из перспективных путей обеспечения высоких требований к эксплуатационным характеристикам современной авиационной, автомобильной и военной техники при уменьшении ее массы является использование полимерных слоистых композиционных материалов. Одной из причин, сдерживающих более широкое применение этих материалов, является наличие технологических дефектов, оказывающих существенное влияние на физико-механические характеристики этих материалов, включая характеристики сопротивления деформированию и разрушению. К числу технологических дефектов относятся отклонения углов ориентации нитей однонаправленных слоев или тканей и отклонения углов укладки слоев от проектных значений. Целью работы является исследование влияния отклонений углов ориентации нитей однонаправленных слоев или тканей в слое и отклонений углов укладки слоев в полимерном слоистом композиционном материале на его сопротивление деформированию и разрушению, учету этого влияния при проектировании.

Материалы и методы. В качестве исследуемых материалов выбраны полимерные слоистые композиционные материалы. При изучении технологических дефектов использованы оптические методы исследования микро- и макроструктуры, при экспериментальном исследовании сопротивления деформированию и разрушению – методы лабораторных испытаний, при теоретическом исследовании – методы компьютерного моделирования.

Результаты. Установлены зависимости между характеристиками отклонения углов ориентации нитей однонаправленных слоев или тканей и характеристиками отклонений углов укладки слоев в полимерном слоистом композиционном материале от проектных значений, с одной стороны, и характеристиками его сопротивления деформированию и разрушению, показана возможность использования этих зависимостей при проектировании, с другой стороны.

Выводы. Влияние отклонений углов ориентации нитей однонаправленных слоев или тканей и отклонений углов укладки слоев в полимерном слоистом композиционном материале от проектных значений на характеристики его сопротивления деформированию и разрушению существенно и должно учитываться при проектировании.

Ключевые слова: полимерные слоистые композиционные материалы, дефекты полимерных слоистых композиционных материалов, микро- и макроструктура полимерных слоистых композиционных материалов, сопротивление деформированию и разрушению.

Е. Д. Kartashova, A. Yu. Muzyemnek

THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL DEVIATIONS OF THE REINFORCEMENT'S LOCATION IN A POLYMERIC LAYERED COMPOSITE MATERIAL ON RESISTANCE TO DEFORMATION AND DESTRUCTION

Abstract.

Background. One of the promising ways to ensure compliance with high requirements for the performance characteristics of modern aerospace, automotive and military equipment at reduction in mass is the use of polymeric layered composite materials. One of the reasons restraining wider use of these materials is the presence of technological defects that have a significant effect on the physico-mechanical characteristics of these materials, including resistance to deformation and fracture characteristics. Among the technological defects are deviations of thread orientation angles of unidirectional layers or fabrics, as well as deviations of layer laying angles from the design values. The aim of the paper is to investigate the influence of deviation of thread orientation angles of unidirectional layers or fabrics in the layer and deviations of layer laying angles in the polymeric layered composite material on its resistance to deformation and destruction, and to account for this influence during the design.

Materials and methods. Polymeric layered composite materials were chosen as the materials to be studied. In the study of technological defects the authors used optical methods for studying micro- and macrostructures; in the experimental study of resistance to deformation and fracture - methods of laboratory testing; in the theoretical studies - methods of computer modeling.

Results. The work establishes the dependencies between the characteristics of deviations of thread orientation angles of unidirectional layers or fabrics and the characteristics of deviations of layer stacking angles in the polymeric layered composite material from the design values and the characteristics of its resistance to deformation and fractures, as well as shows the possibility of using these dependencies in the design.

Conclusions. The influence of deviations of thread orientation angles of unidirectional layers or fabrics and deviations of layer laying angles in the polymeric layered composite material from the design values on the characteristics of its resistance to deformation and fracture is significant and must be taken into account in the design.

Key words: polymeric layered composite materials, defects in polymeric layered composite materials, micro- and macrostructure of polymeric layered composite materials, resistance to deformation and fracture.

Введение

Одним из перспективных путей обеспечения высоких требований к эксплуатационным характеристикам современной аэрокосмической, автомобильной и военной техники при уменьшении ее массы является использование полимерных слоистых композиционных материалов (ПСКМ). Одной из причин, сдерживающих более широкое применение этих материалов, является наличие технологических дефектов, оказывающих существенное влияние на физико-механические характеристики этих материалов, включая характеристики сопротивления деформированию и разрушению. К числу технологических дефектов относятся отклонения углов ориентации нитей однонаправленных слоев или тканей от проектных и отклонения углов укладки слоев [1].

Локальные отклонения углов ориентации нитей однонаправленных слоев или тканей от проектных значений могут проявляться в виде искривлений волокон в плоскости слоев, свилей, складок или гофров. Причинами появления таких дефектов являются плохое уплотнение тканевого пакета, колебания приложенного давления при формовании, кривизна поверхности, на которую выкладывается ткань, а также сжимающие напряжения, возникающие в ткани или слое.

Причиной глобального отклонения углов ориентации нитей однонаправленных слоев или тканей от проектных значений может являться отклонение углов укладки слоев от проектных значений. Причиной появления таких дефектов являются ошибки в раскрое и выкладке тканевого пакета.

Сопrotивление деформированию ПСКМ характеризуют матрицы жесткости или податливости и инженерные константы каждого слоя. Сопrotивление деформированию всего композита может быть выполнено с использованием классической теории ламинатов. Для оценки влияния технологических отклонений на сопротивление деформированию всего композита могут быть использованы [2]:

- матрицы жесткости и податливости;
- нормализованные матрицы жесткости и податливости;
- инженерные константы;
- полярные диаграммы свойств.

Сопrotивление разрушению ПСКМ характеризуют прежде всего пределы прочности материала каждого слоя, определенные для одноосного растяжения, сжатия и сдвига. Дополнительно сопротивление разрушению каждого слоя характеризуют параметры критериев разрушения, которые в наилучшей степени подходят для рассматриваемого материала, например параметры критериев Цзя-Ву, Цзя-Хилла, Хоффмана, Хашина, Пака, LaRC и Кунтце. Для оценки сопротивления разрушению всего композита также могут быть использованы эти параметры и критерии. Различие в оценке прочности каждого слоя и всего ламината будет в том, что в первом случае при вычислении функций критериев разрушения будут использоваться значения напряжений или деформаций в слое, а во втором случае осредненные по толщине композита.

Целью работы является исследование влияния отклонений углов ориентации нитей однонаправленных слоев или тканей в слое и отклонения углов укладки слоев в полимерном слоистом композиционном материале на его сопротивление деформированию и разрушению, учету этого влияния при проектировании.

1. Технологические отклонения расположения армирующего

1.1. Отклонение угла ориентации нитей от проектных значений

Структуру ткани характеризует репрезентативная ячейка (*Representative Volume Element – RVE*). В ней все нити имеют определенное направление, которое может быть задано ориентационным вектором \mathbf{p} . Ориентационный вектор в системе координат RVE может быть определен с помощью сферических углов θ и φ , показанных на рис. 1. Оси 1 и 2 лежат в плоскости ткани,

ось 3 образует с ними левую тройку векторов. Угол θ – это угол между ориентационным вектором и осью 3, угол φ – это угол между осью 1 и проекцией ориентационного вектора на плоскость, проходящую через оси 1 и 2.

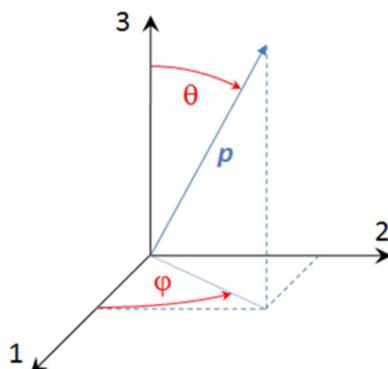
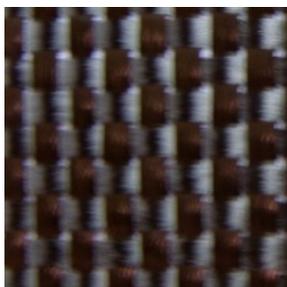


Рис. 1. Определение ориентационного вектора \mathbf{p} в системе координат RVE с помощью углов θ и φ

В дальнейшем будут рассматриваться технические ткани, у которых нити расположены так, что угол θ близок к 90° , а угол φ может изменяться от нуля до 180° . Отклонение угла ориентации нитей φ от проектных значений назовем отклонением угла ориентации нитей и обозначим γ .

В качестве примера рассмотрим углеткань 200 г/м^2 , 3К, имеющую полотняное плетение, внешний вид и характеристики которой представлены на рис. 2.



а)

Толщина ткани, мм	0,24
Ширина репрезентативной ячейки, мм	4,4
Ширина нитей, мм	2
Пористость ткани, %	53,7

б)

Рис. 2. Внешний вид (а) и параметры тканевого слоя (б)

В состоянии поставки ткани нити основы и утка расположены под углом $\varphi_T = \varphi_o - \varphi_y = 90^\circ$, где φ_o, φ_y – углы ориентации нитей основы и утка соответственно. Определить диапазон изменения отклонения угла ориентации нитей γ от этого значения можно в результате лабораторных испытаний тканей на сдвиг. Для этого было разработано приспособление, внешний вид которого показан на рис. 3,а. Приспособление представляет собой шарнирно-стержневой механизм, устанавливаемый в захваты испытательной машины МИ-40КУ. В процессе испытаний расстояние между шарнирами одной диа-

гонали увеличивается, между шарнирами другой – уменьшается. Изначально квадратная форма испытываемого лабораторного образца из ткани приобретает форму ромба (рис. 3,б,в). В процессе испытаний регистрируется усилие, необходимое для деформации образца.

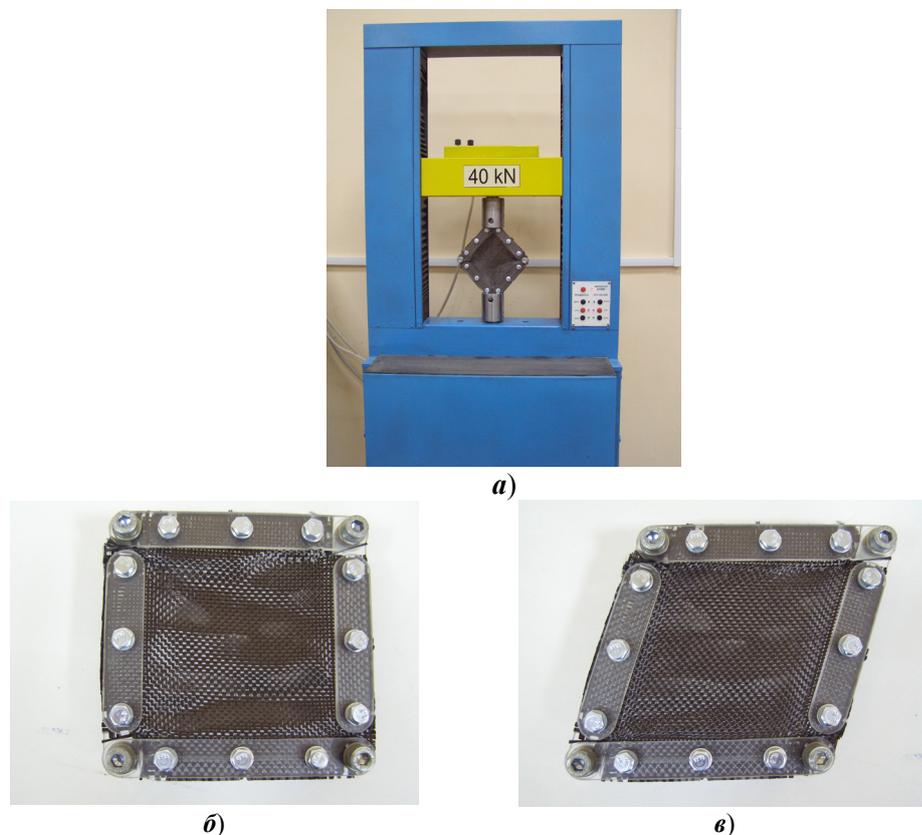


Рис. 3. Схема испытаний ткани на сдвиг: *а* – внешний вид устройства; *б* – начальное положение ткани; *в* – текущее положение ткани

В качестве примера на рис. 4 показан график изменения сопротивления сдвигу от величины сдвига углеткани 200 г/м^2 , 3К. Для достаточно широкой номенклатуры технических тканей из углеродных, арамидных, стеклянных нитей графики изменения сопротивления сдвигу от величины сдвига имеют похожий вид. На графике можно выделить три характерных участка: участок свободного сдвига, переходной участок и участок стесненного сдвига.

На участке свободного сдвига ткань деформируется без приложения существенного усилия. На участке стесненного сдвига для продолжения деформации требуется значительно большее усилие. Деформация ткани на этом участке характеризуется образованием волнистости, а при продолжении деформирования – складок. Между первым и третьим участками находится достаточно узкий переходной участок. Определим два характерных для данного графика значения деформации сдвига: γ_I – максимальное отклонением угла ориентации нитей на первом участке; γ_{II} – максимальное отклонением угла ориентации нитей на втором участке. Для углеткани 200 г/м^2 , 3К, значения

характерных углов ориентации нитей на первом и втором участках соответственно равны 12 и 15° .

Действительные значения отклонения угла ориентации нитей γ даже для выровненного по периметру тканевого слоя являются случайной величиной. С целью выявления статистических характеристик распределения этой случайной величины были выполнены измерения углов отклонения нитей основы и утка в 128 случайно выбранных точек листа ткани, имеющего ширину 1250 и длину 1000 мм. Отклонение угла ориентации нити вычислено как разность этих величин. Гистограмма эмпирической функции плотности распределения отклонения угла ориентации нити показана на рис. 5. Функция плотности распределения отклонения угла ориентации нити соответствует нормальному закону распределения.

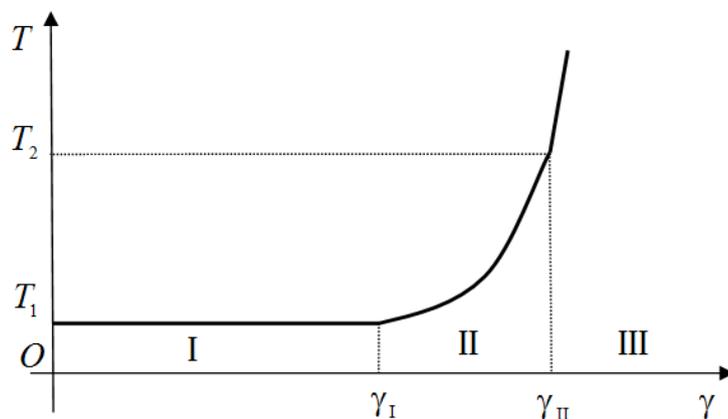


Рис. 4. График изменения сопротивления сдвигу от величины сдвига: I – свободный сдвиг; II – переходной участок; III – стесненный сдвиг

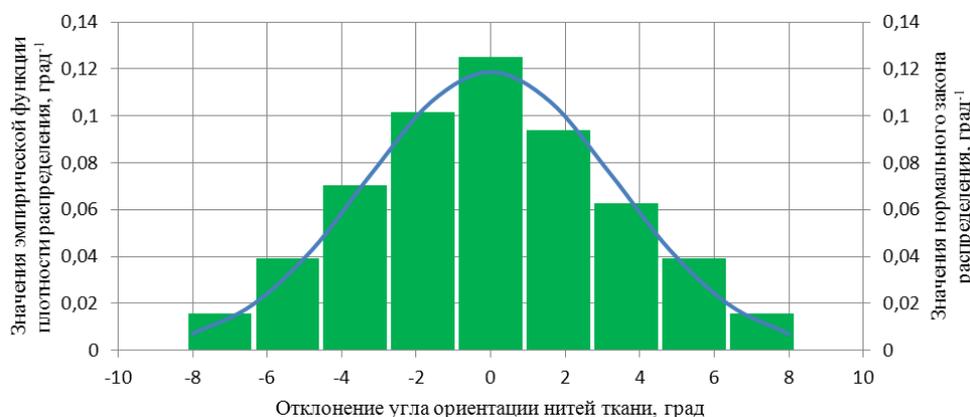


Рис. 5. Гистограмма и график функции плотности распределения отклонения угла ориентации нити

Математическое ожидание отклонения угла ориентации нити равно нулю, среднеквадратическое отклонение – $3,36^\circ$. Соответствующий график нормального закона распределения показан на рис. 5.

1.2. Отклонение углов ориентации тканевых слоев

ПСКМ, полученный по технологии ручного формования, вакуумного мешка, вакуумной инфузии или с использованием других технологий, состоит из нескольких слоев, вырезанных и уложенных в пакет в ручную или с использованием технических средств автоматизации этих процессов. Отклонения угла ориентации слоев от проектных значений δ являются случайной величиной. С целью выявления статистических характеристик распределения этой случайной величины были выполнены измерения углов отклонения слоев при ручной вырезке и укладки в пакет, имеющего ширину 200 и длину 200 мм, 20 листов ткани. Исследованию подвергнуты 20 тканевых пакетов. Гистограмма эмпирической функции плотности распределения отклонения угла ориентации нити показана на рис. 6.

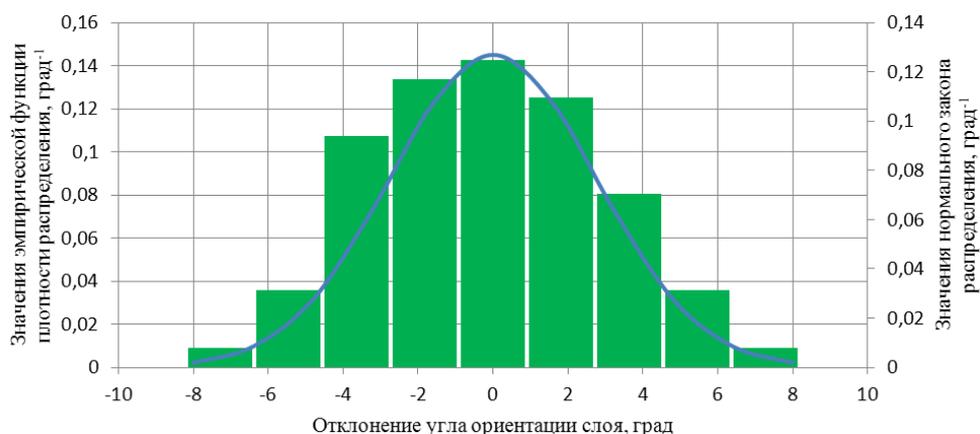


Рис. 6. Гистограмма и график функции плотности распределения отклонения угла ориентации тканевого слоя

Математическое ожидание отклонения угла ориентации тканевого слоя равно нулю, среднеквадратическое отклонение – $2,75^\circ$. Функции плотности вероятности отклонения угла ориентации тканевого слоя соответствуют нормальному закону распределения. Соответствующий график нормального закона распределения показан на рис. 6.

2. Влияние технологических отклонений расположения армирующего на сопротивление деформированию полимерных слоистых композиционных материалов

2.1. Отклонение угла ориентации нитей от проектных значений

С целью исследования влияния отклонений угла ориентации нитей от проектных значений на сопротивление деформированию проведено компьютерное моделирование и определены матрицы жесткости и податливости, нормализованные матрицы жесткости и податливости, инженерные константы RVE слоя ПСКМ при четырех значениях отклонения угла ориентации нитей: $\gamma_0 = m_\gamma = 0$; $\gamma_1 = m_\gamma + \sigma_\gamma = 3,36^\circ$; $\gamma_2 = m_\gamma + 2\sigma_\gamma = 6,72^\circ$; $\gamma_3 = m_\gamma + 3\sigma_\gamma = 10,08^\circ$. В качестве примера на рис. 7 показаны геометрические модели RVE

слоя ПСКМ из углеткани 200 г/м², 3К, и эпоксидной системы Erolam 2017, имеющие различные значения отклонения угла ориентации нитей. Рассчитанные значения инженерных констант для этих четырех расчетных случаев приведены в табл. 1.

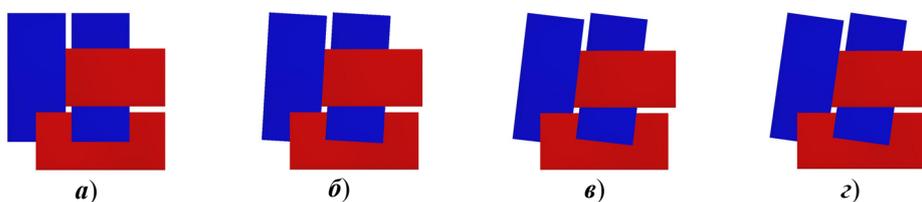


Рис. 7. Геометрическая модель RVE:

$$a - \gamma = 0; \quad б - \gamma = 3,36^\circ; \quad в - \gamma = 6,72^\circ; \quad г - \gamma = 10,08^\circ$$

Таблица 1

Инженерные константы слоя при различных значениях отклонений

Наименование инженерной константы	Значениях отклонения угла ориентации нитей			
	0	3,36°	6,72°	10,08°
Модуль продольной упругости E_1 , ГПа	11,5	12,5	13,9	14,5
Модуль поперечной упругости E_2 , ГПа	11,5	10,7	10,0	9,73
Модуль поперечной упругости E_3 , ГПа	9,36	9,36	9,3	9,33
Коэффициент Пуассона ν_{12}	0,803	0,871	0,941	0,970
Коэффициент Пуассона ν_{21}	0,803	0,737	0,674	0,650
Коэффициент Пуассона ν_{13}	0,102	0,080	0,058	0,050
Коэффициент Пуассона ν_{31}	0,083	0,060	0,03	0,032
Коэффициент Пуассона ν_{23}	0,102	0,124	0,144	0,152
Коэффициент Пуассона ν_{32}	0,083	0,109	0,135	0,146
Модуль сдвига в плоскости ламината G_{12} , ГПа	25,6	25,5	25,4	25,2
Модуль сдвига вне плоскости ламината G_{13} , ГПа	3,31	3,32	3,33	3,34
Модуль сдвига вне плоскости ламината G_{23} , ГПа	3,31	3,30	3,28	3,28

Примечания:

1. Плотность композита при всех значениях отклонений угла ориентации нитей равна 1,535 г/см³.

2. Инженерные константы определены в системе координат, ось 1 которой направлена вдоль биссектрисы угла, образованного проекциями осей нитей на плоскость композита, ось 2 лежит в плоскости композита и перпендикулярна оси 1, ось 3 образует с осями 1 и 2 левую тройку.

Результаты расчета показывают, что отклонение угла ориентации нитей от проектных значений приводят к существенному увеличению модуля нормальной упругости E_1 и уменьшению модуля нормальной упругости E_2 . При этом изменение значений других инженерных констант менее существенно.

2.2. Отклонение углов ориентации тканевых слоев

С целью исследования влияния отклонений угла ориентации слоев от проектных значений на сопротивление деформированию проведено компьютерное моделирование и определены распределения инженерных констант ПСКМ при случайных значениях их углов ориентации. В качестве примера на рис. 8 показана эмпирическая гистограмма плотности распределения модуля упругости E_1 ПСКМ, состоящего из четырех тканевых слоев толщиной 0,24 мм, из углеткани 200 г/м², 3К, и эпоксидной системы Erolam 2017. Расположение системы координат такое же, как и в предыдущем случае. На рис. 8 также показана эмпирическая функция распределения модуля нормальной упругости E_1 . Значение математического ожидания модуля нормальной упругости E_1 равно 52,7 ГПа, среднеквадратическое отклонение – 1,24 ГПа. На рис. 9 приведены полярные диаграммы упругих свойств данного ПСКМ.

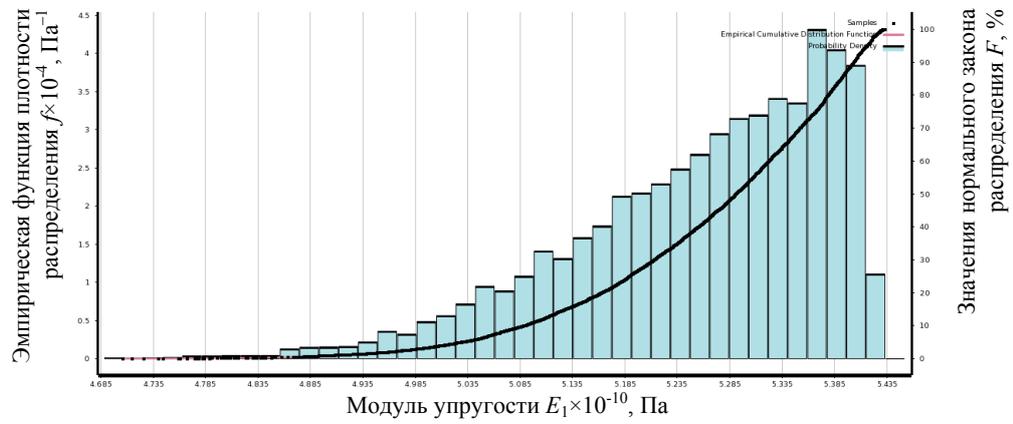


Рис. 8. Гистограмма функции плотности и график функции распределения модуля упругости E_1

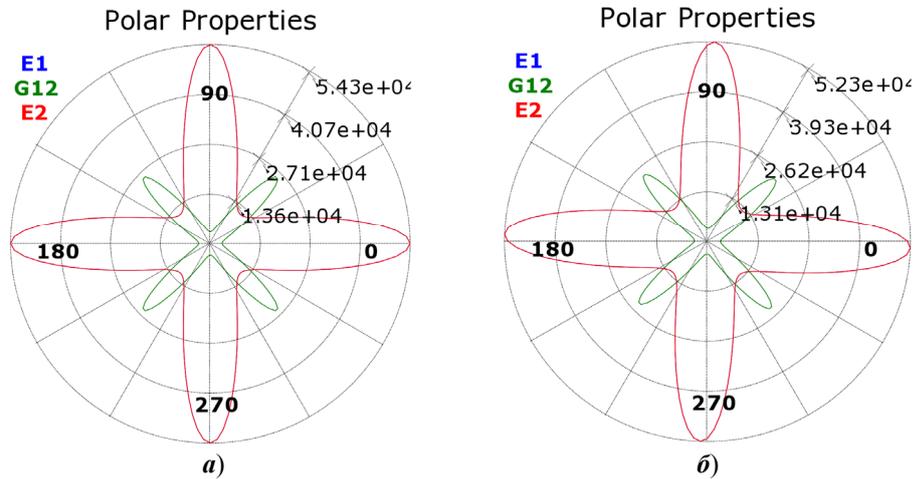
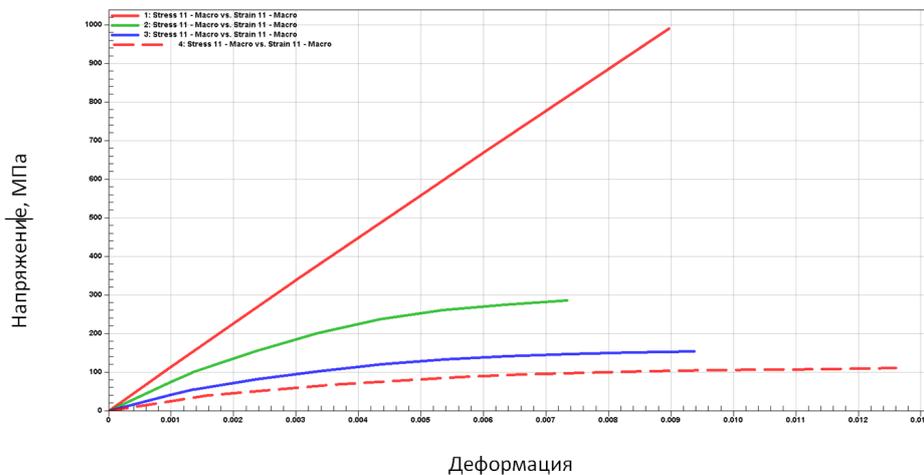


Рис. 9. Полярные диаграммы упругих свойств: *a* – укладка слоев без отклонения углов ориентации тканевых слоев; *b* – отклонения $\delta_1 = 0^\circ$, $\delta_2 = 0^\circ$, $\delta_3 = 0^\circ$, $\delta_4 = 8,75^\circ$

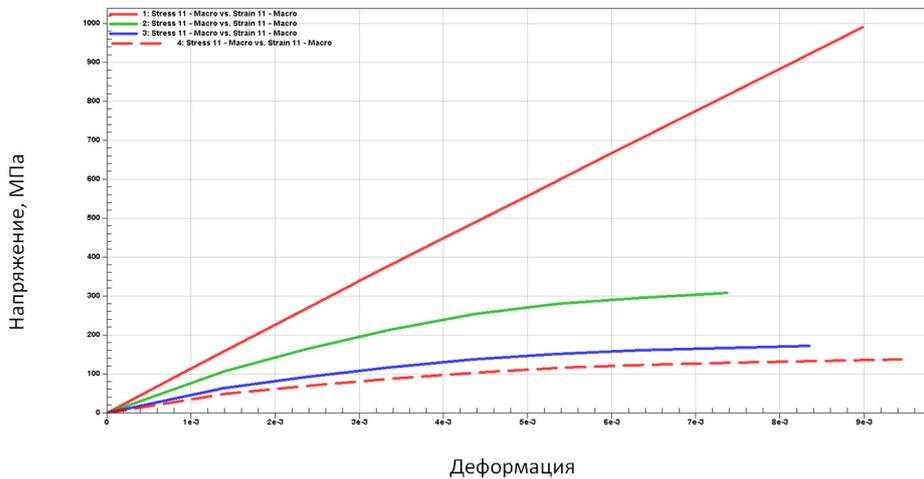
3. Влияние технологических отклонений расположения армирующего на сопротивление разрушению полимерных слоистых композиционных материалов

3.1. Отклонение угла ориентации нитей от проектных значений

С целью исследования влияния отклонений угла ориентации нитей от проектных значений на сопротивление разрушению проведено компьютерное моделирование и построены диаграммы деформирования до разрушения RVE слоя ПСКМ при четырех значениях отклонения угла ориентации нитей: $\gamma_0 = m_\gamma = 0$; $\gamma_1 = m_\gamma + \sigma_\gamma = 3,36^\circ$, $\gamma_2 = m_\gamma + 2\sigma_\gamma = 6,72^\circ$, $\gamma_3 = m_\gamma + 3\sigma_\gamma = 10,08^\circ$. В качестве примера на рис. 10 показаны диаграммы деформирования до разрушения RVE слоя ПСКМ из углеткани 200 г/м², 3К, и эпоксидной системы Epolam 2017 при отсутствии и при наличии отклонения угла ориентации нитей, равном 10,08°.



а)



б)

Рис. 10. Диаграммы деформирования ПСКМ до разрушения при углах приложения нагрузки: а – $\gamma = 0$; б – $\gamma = 10,08^\circ$

Кривые на графиках соответствуют различным углам приложения нагрузки по отношению к направлению нитей основы: кривые 1, 2 и 3 соответствуют углам приложения нагрузки 0, 11,25, 22,5 и 45° соответственно.

Результаты расчета показывают, что отклонение угла ориентации нитей от проектных значений существенно влияют на сопротивление разрушению при всех направлениях приложения нагрузки.

3.2. Отклонение углов ориентации тканевых слоев

С целью исследования влияния отклонений угла ориентации слоев от проектных значений на сопротивление разрушению проведено компьютерное моделирование и определено распределение предела прочности в направлении наименьшего сопротивления композита при случайном распределении углов ориентации тканевых слоев. В качестве примера на рис. 11 показана эмпирическая гистограмма плотности распределения предела прочности S_1 при растяжении ПСКМ, состоящего из четырех слоев толщиной 0,24 мм, из углеткани 200 г/м², 3К, и эпоксидной системы Erolam 2017. На рис. 11 также показана эмпирическая функция распределения предела прочности. Значение математического ожидания предела прочности S_1 равно 52,7 ГПа, средне-квадратическое отклонение – 1,24 ГПа.

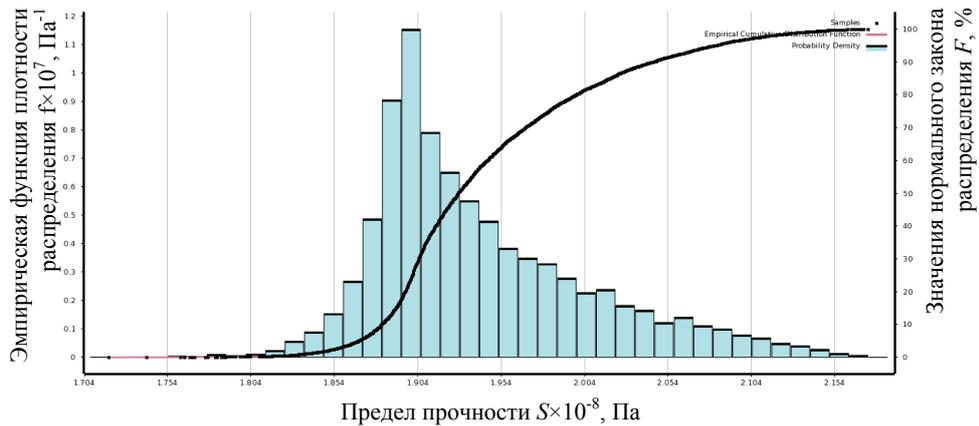


Рис. 11. Гистограмма функции плотности и график функции распределения предела прочности ПСКМ при случайном распределении углов ориентации тканевых слоев

Заключение

В работе исследовано влияние отклонений углов ориентации нитей тканей в слое и отклонений углов укладки слоев в ПСКМ на его сопротивление деформированию и разрушению. В результате исследования:

- установлено, что отклонение угла ориентации нитей в слое и углов ориентации тканевых слоев от проектных значений приводит к существенному изменению модулей нормальной упругости E_1 и E_2 , а также пределов порочности композита при всех направлениях приложения нагрузки;

- определены вероятностные характеристики распределений модуля нормальной упругости и предела порочности композита в направлении

наименьшего сопротивления разрушению, которые могут быть использованы при учете влияния рассматриваемых технологических дефектов на их сопротивление деформированию и разрушению.

Библиографический список

1. **Карташова, Е. Д.** Технологические дефекты полимерных слоистых композиционных материалов / Е. Д. Карташова, А. Ю. Муйземнек // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 2 (42). – С. 79–89.
2. **Муйземнек А. Ю.** Механика деформирования и разрушения полимерных слоистых композиционных материалов : учеб. пособие / А. Ю. Муйземнек, Е. Д. Карташова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2017. – 77 с.

References

1. Kartashova E. D., Muzyemnek A. Yu. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2017, no. 2 (42), pp. 79–89.
2. Muzyemnek A. Yu., Kartashova E. D. *Mekhanika deformirovaniya i razrusheniya polimernykh sloistykh kompozitsionnykh materialov: ucheb. posobie* [Deformation and destruction mechanics of polymeric layered composite materials: teaching aid]. Penza: Izd-vo PGU, 2017, 77 p.

Карташова Екатерина Дмитриевна
аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: katrina89@yandex.ru

Kartashova Ekaterina Dmitrievna
Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Муйземнек Александр Юрьевич
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой теоретической
и прикладной механики и графики,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: muzyemnek@yandex.ru

Muzyemnek Aleksandr Yur'evich
Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department of theoretical
and applied mechanics and graphics,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

УДК 621

Карташова, Е. Д.

Влияние технологических отклонений расположения армирующего в полимерном слоистом композиционном материале на сопротивление деформированию и разрушению / Е. Д. Карташова, А. Ю. Муйземнек // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 3 (43). – С. 134–145. DOI 10.21685/2072-3059-2017-3-11