

УДК 620.1

DOI 10.33113/mkmk.ras.2021.27.01.073_088.06

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СДВИГОВОЙ ПРОЧНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИНДЕНТИРОВАНИИ

Орешко Е.И., Ерасов В.С., Уткин Д.А., Яковлев Н.О.

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Министерства промышленности и торговли Российской Федерации, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

В работе предложен подход к определению адгезионной прочности волокно-матрица методом выталкивания цилиндрическим индентором с плоским основанием миниатюрного цилиндра, включающего нескольких тысяч единичных волокон, из утоненного образца углепластика.

Для испытаний полимерных композиционных материалов на сдвиг методом индентирования была разработана оснастка, которая имела паз для фиксации образца при испытании и отверстие, которое обеспечивает выдавливание части образца под индентором. Также был разработан и изготовлен индентор цилиндрической формы, который позволяет выдавливать цилиндрическую часть образца в отверстие на оснастке.

Метод является экономичным, так как толщина образцов не превышает 2 мм, что выгодно отличает его от методов определения прочности при сдвиге современными методами: методом короткой балки и методом Иосипеску, которые требуют образцы больших размеров.

Рассмотрены типы деформирования и разрушения образцов после испытаний, виды диаграмм деформирования при испытаниях и их характерные участки.

Результаты проведенных испытаний показывают, что диаграммы сдвига имеют три характерных участка:

- квазилинейный участок упругого нагружения, на котором усилие выталкивания линейно растет с увеличением глубины внедрения индентора;
- ступенчатый участок возникновения и развития разрушения с потерей энергии деформирования на развитие новых свободных поверхностей разрушения, представлен в виде резких падений усилия выталкивания;
- пологий участок скольжения с трением миниатюрного мультифиламентного цилиндра при его выталкивании из образца-шлифа.

Проведено сравнение полученных результатов испытаний со значениями прочности при сдвиге ПКМ, полученными методом наноиндентирования.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал; адгезионная прочность волокно-матрица; индентирование; напряжения; сдвиг

DETERMINATION OF SHIFT DURABILITY OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS AT AN INDENTATION

Oreshko E.I., Erasov V.S., Utkin D.A., Yakovlev N.O.

VIAM Federal State Unitary Enterprise "All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials", Moscow, Russia

ABSTRACT

Fiber-matrix adhesive strength determination approach using method of pushing out the multifilament cylinder from the thin carbon fiber polymer composite sample by the cylindrical indenter with the flat basis is offered.

The equipment which had a groove for sample fixing at test and an opening which provides expression of a part of a sample under an indenter was developed for tests of polymeric composite materials for shift by a method of an indentation. Also the indenter of a cylindrical form which allows to squeeze out a cylindrical part of a sample in an opening on equipment was developed and made.

The method is economic as the thickness of samples does not exceed 2 mm that favourably distinguishes it from methods of determination of durability at shift by modern methods: method of a short beam and Iosipesku's method which demand samples of the big sizes.

Types of deformation and destruction of samples after tests, types of charts of deformation are considered at tests and their characteristic sites.

Results of the carried-out tests show that charts of shift have three characteristic sites:

- a quasilinear site of elastic loading on which the effort of pushing out linearly grows with increase in depth of introduction of an indenter;
- the step site of emergence and destruction development with loss of energy of deformation on development of new free surfaces of destruction, is presented in the form of sharp falling of effort of pushing out;
- a flat site of sliding with a friction of the tiny multifilament cylinder at its pushing out from a sample-section.

Comparison of the received results of tests with values of durability is carried out at shift by polymer composite materials received by a method of a nanoindentation.

Keywords: polymer composite material; fiber-matrix adhesion strength; indentation; stress; shear

ВВЕДЕНИЕ

Развитие авиации и космонавтики связано с созданием новых материалов, в первом ряду которых в настоящее время находятся полимерные композиционные материалы (ПКМ) [1-6]. Эти материалы обеспечивают высокую удельную прочность, эксплуатационную надежность и долговечность [7-12], что очень важно не только для применения в авиационно-космической технике, но и в других отраслях промышленности (судостроении, энергетике, строительстве и т.п.). В условиях эксплуатации изделия и конструкции из ПКМ подвергаются различным видам механических напряжений, что может приводить к изменению их структуры и, соответственно, работоспособности [13-17].

Для оценки стабильности эксплуатационных характеристик при силовом воздействии необходимо определение физико-механических свойств ПКМ [18-23].

В последнее время проводятся исследования, посвященные совершенствованию методов улучшения взаимодействия «волокно-матрица» [24-27] и методов определения величины адгезионной прочности «волокно-матрица» [28-32].

Расслоение из-за низкой сдвиговой прочности является основным видом повреждения ПКМ, поэтому необходимо проводить испытание ПКМ на межслойный сдвиг [33-37].

В работе [38-40] предложен метод испытаний ПКМ на сдвиг с помощью индентирования и показано, что разрушение при испытании носит преимущественно адгезионный характер (проходит по границе раздела волокно-матрица). В развитие этой темы в работе будут рассмотрены результаты испытания

полимерных композиционных материалов на сдвиг методом индентирования. Будут рассмотрены типы деформирования и разрушения образцов после испытаний, виды диаграмм деформирования при испытаниях и их характерные участки. Будет проведено сравнение полученных результатов испытаний со значениями прочности при сдвиге ПКМ, полученными методом наноиндентирования [41,42].

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования в данной работе являются два однонаправленных углепластика (ПКМ-1 и ПКМ-2) с одинаковой матрицей на основе эпоксидного связующего модифицированного полисульфоном и углеродными наполнителями. Пробоподготовка образцов-шлифов для испытаний методом выталкивания тонким цилиндрическим индентором миниатюрного цилиндра включала вырезание пробы толщиной 2 мм (толщина материала) перпендикулярно оси волокон, механическое утонение и шлифование пробы. Данным способом были подготовлены образцы-шлифы углепластиков толщиной от 0,60 до 1,70 мм.

Для испытаний полимерных композиционных материалов на сдвиг методом индентирования была разработана оснастка, которая имела паз для фиксации образца при испытании и отверстие, которое обеспечивает выдавливание части образца под индентором. Также был разработан и изготовлен индентор цилиндрической формы диаметром $\varnothing 0,6$ мм, который позволяет не расклинивать образец при нагружении, а выдавливать его цилиндрическую часть (в области контакта с индентором) в отверстие на оснастке с противоположной стороны образца.

Цилиндрический индентор с плоским основанием выталкивает из выбранных на поверхности шлифа мест мультифиламентные цилиндры $\varnothing 0,6$ мм и высотой, равной толщине шлифа. Цилиндры состоят из нескольких тысяч единичных волокон, соединенных полимерной матрицей.

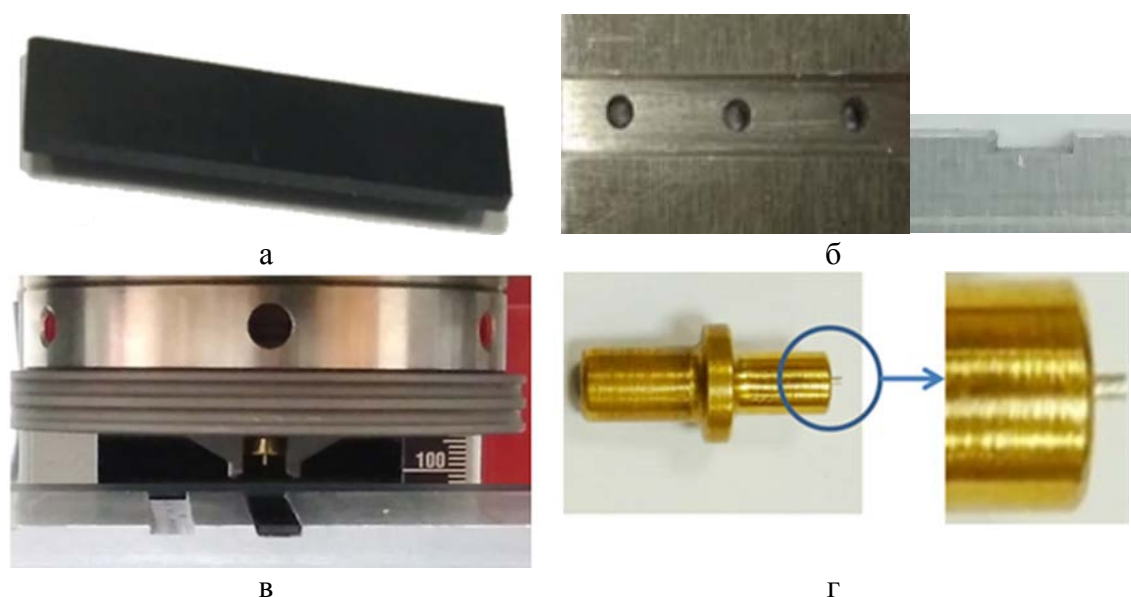


Рис.1. Испытания образцов ПКМ на сдвиг методом индентирования: а) образец для испытаний; б) внешний вид паза для фиксации образца в оснастке (вид сверху и сбоку); в) внешний вид испытания; г) внешний вид индентора для испытаний.

На рис.1 показаны образцы и оснастка для испытаний на сдвиг полимерных композиционных материалов методом индентирования.

Шлиф закрепляют на подготовленной металлической подложке таким образом, чтобы оси цилиндрического индентора, выталкиваемого мультифиламентного цилиндра, и сквозного отверстия $\varnothing 1,00$ мм в подложке совпали. Проводят испытание при мягком или жестком нагружении [19-25]. Регистрируют усилие и перемещение индентора.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

На рис.2 показаны фотографии образцов для испытаний на сдвиг после индентирования. При большой толщине образца (более 1,6 мм) происходит его индентирование с отпечатком от индентора без выдавливания мультифиламентного цилиндра при деформации сдвига (рис.2а). В случае небольших толщин образцов (до 1 мм) может наблюдаться разрушение образца на две и более части (рис.2б) или образование трещины (рис.2в) от отпечатка до торца образца, что снижает усилие выталкивания мультифиламентного цилиндра и значение прочности при сдвиге. Экспериментально была определена оптимальная толщина образца для испытаний, при которой происходит сдвиг по границе волокно-матрица из-за выталкивания мультифиламентного цилиндра. Таким образом, образец целесообразно выбирать от 1 мм до 1,6 мм толщиной.

Диаграммы выталкивания (сдвига) миниатюрного мультифиламентного цилиндра индентором из образцов различной толщины приведены на рис.3. Они представлены в координатах «усилие выталкивания F – глубина внедрения индентора h ». Используя формулу (1), усилие F можно пересчитать в напряжение сдвига τ

$$\tau = \frac{F}{\pi dt}, \quad (1)$$

где F – усилие выталкивания, Н; d – диаметр индентора, м; t – толщина образца-шлифа, м.

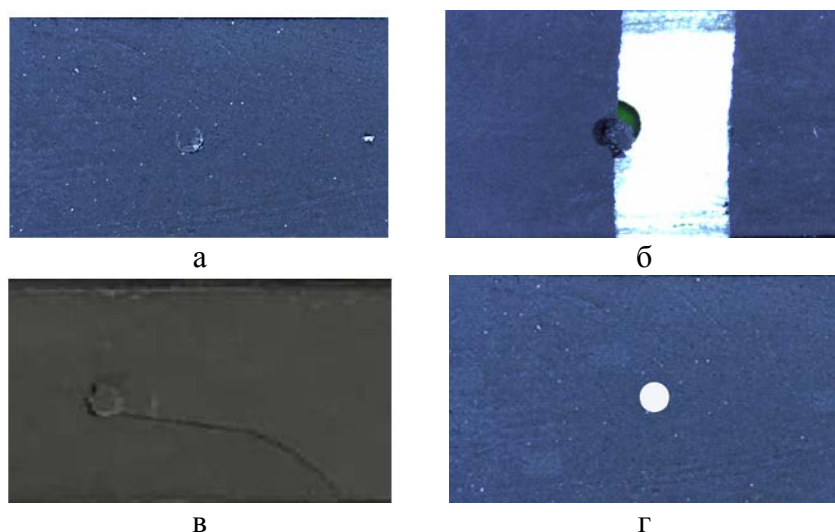


Рис.2. Образцы для испытаний на сдвиг после индентирования: а) отпечаток от индентора при большой толщине образца, в случае индентирования без сдвига; б) разрушение образца на две части; в) развитие трещины в образце; г) сдвиг при выталкивании мультифиламентного цилиндра.

Анализ диаграмм сдвига материалов (рис.3) показывает, что образцы ПКМ-1 (рис.3а) деформируются с тремя характерными участками: линейный возрастающий до максимальной нагрузки; участок спада нагрузки и пологий участок скольжения выдавленного из образца цилиндра. Исключение составляет образец толщиной 1,4 мм, который на первом участке деформировался с возрастающей нагрузкой до 140 Н, после чего последовал резкий спад усилия нагружения с образованием пика, после чего дальнейшее возрастание нагрузки до максимального значения 153,6 Н.

Образцы ПКМ-2 (рис.3б) имеют несколько нехарактерных диаграмм сдвига (диаграммы 1 и 5), на которых первый участок ступенчато возрастает до максимального усилия с образованием пиков из-за спада нагрузки. Первый участок для образца 1 ПКМ-2 продолжается до глубины 260 мкм, по сравнению со 160 мкм для образца 3 ПКМ-1, что возможно связано с дефектами материала, из-за которых возникают пики на диаграммах нагружения.

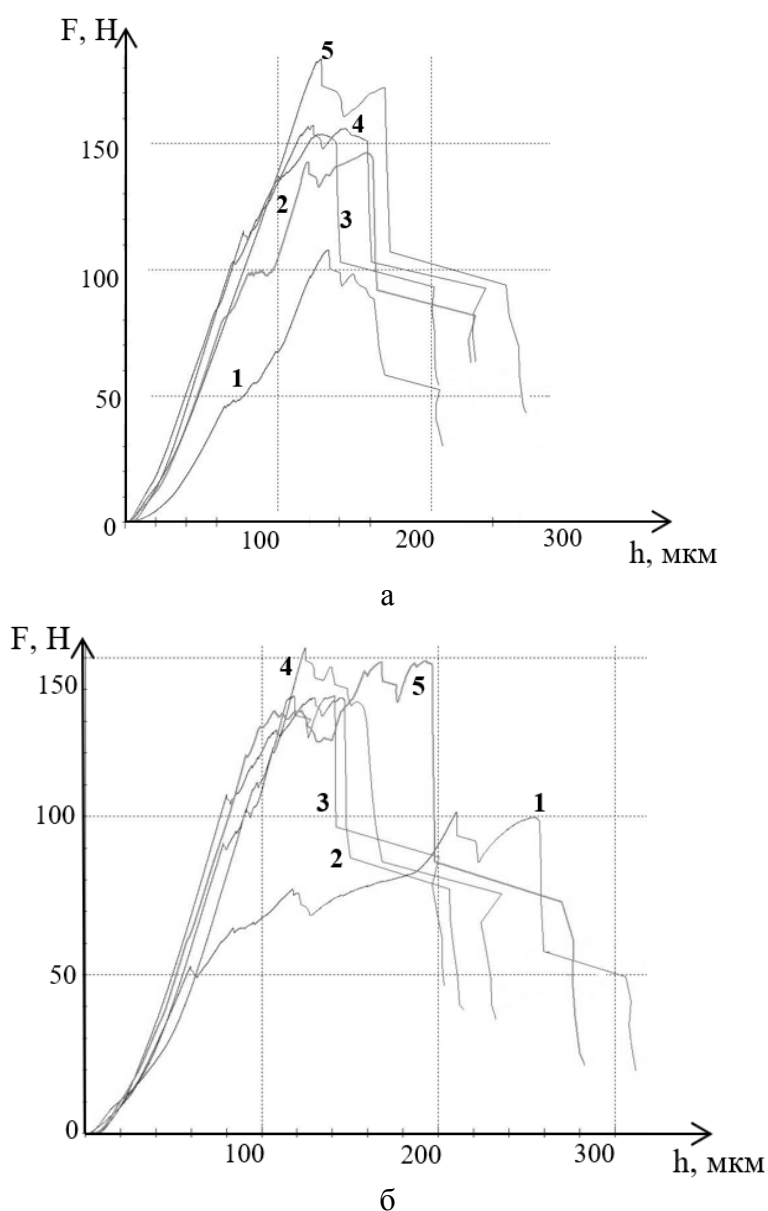


Рис.3. Диаграммы сдвига при индентировании для образцов из ПКМ-1 (а) и ПКМ-2 (б) различной толщины: 1 – 1 мм; 2 – 1,3 мм; 3 – 1,4 мм; 4 – 1,5 мм; 5 – 1,6 мм.

На рис.4 показаны характерные диаграммы деформирования при индентировании на примере результатов испытаний образцов из ПКМ-2, толщиной 1,5 мм:

– диаграмма сдвига 1, которая является положительным результатом и выталкивание мультифиламентного цилиндра происходит без разрушения матрицы и без образования трещин (образец после испытания по диаграмме деформирования 1 показан на рисунке рис.2г);

– диаграмма сдвига 2, для которой характерен первый участок квазилинейного возрастания нагрузки до максимального усилия, дальнейший резкий спад нагрузки до 20-50% от максимального значения из-за образования трещины в образце и последующий рост усилия с образованием второго, меньшего пика на диаграмме деформирования (образец после испытания по диаграмме деформирования 2 показан на рисунке рис.2в);

– диаграмма деформирования 3, которая внешне напоминает диаграмму сдвига 1, также имеет квазилинейный участок нагружения, максимальное усилие при этом меньше, чем на диаграмме 1, так как происходит разрушение образца, но больше, чем усилие при образовании трещины на образце (диаграмма 2). Основное отличие диаграммы 3 от диаграммы 1 это отсутствие пологого третьего участка скольжения с трением миниатюрного мультифиламентного цилиндра при его выталкивании из образца, так как из-за разрушения образца на несколько частей усилие моментально обнуляется. Образец после испытания по диаграмме деформирования 3 показан на рис.2б).

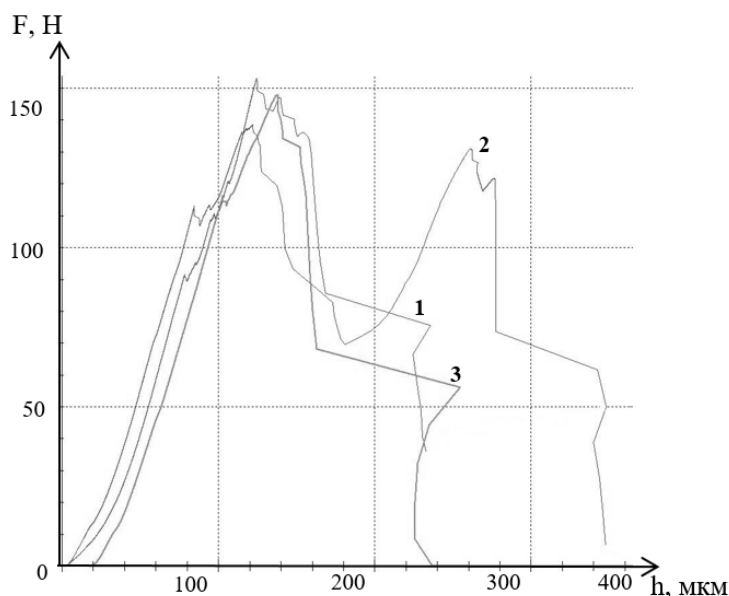


Рис.4. Характерные диаграммы деформирования при индентировании (на примере результатов испытаний образцов из ПКМ-2, толщиной 1,5 мм) в случае: 1 – сдвига (положительный результат, см. рис.2г); 2 – образования трещины на поверхности образца (рис.2в); 3 – разрушения образца на две части (рис.2б).

При уменьшении толщины образца уменьшается максимальное усилие индентирования.

Толщины и величины предела прочности при сдвиге τ испытанных образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Испытания на сдвиг методом индентирования образцов
из ПКМ-1 и ПКМ-2

Толщина, мм	Усилие F, Н		Напряжение τ , МПа	
	ПКМ-1	ПКМ-2	ПКМ-1	ПКМ-2
1	107,8	101,2	57,2	53,7
1,3	146,2	137,3	59,7	56,1
1,4	153,6	137,9	58,2	52,3
1,5	157,1	153	55,6	54,1
1,6	183,2	149	60,7	49,5

На рис.5 показаны характерные диаграммы деформирования при индентировании на примере результатов испытаний образцов из ПКМ-1, толщиной 1,6 мм. Диаграмма сдвига 1 и диаграмма деформирования образца 3 в случае образования трещины, по своему характеру аналогичны диаграммам деформирования образцов ПКМ-2. Диаграмма деформирования 2 представляет собой квазилинейный возрастающий участок индентирования до установленной при испытании, ограничительной нагрузки 200 Н, после которой осуществляется снятие усилия. Разрушение образца при этом не происходит, сдвиг не осуществляется, на поверхности образца возникает отпечаток от индентора, как на рис.2а.

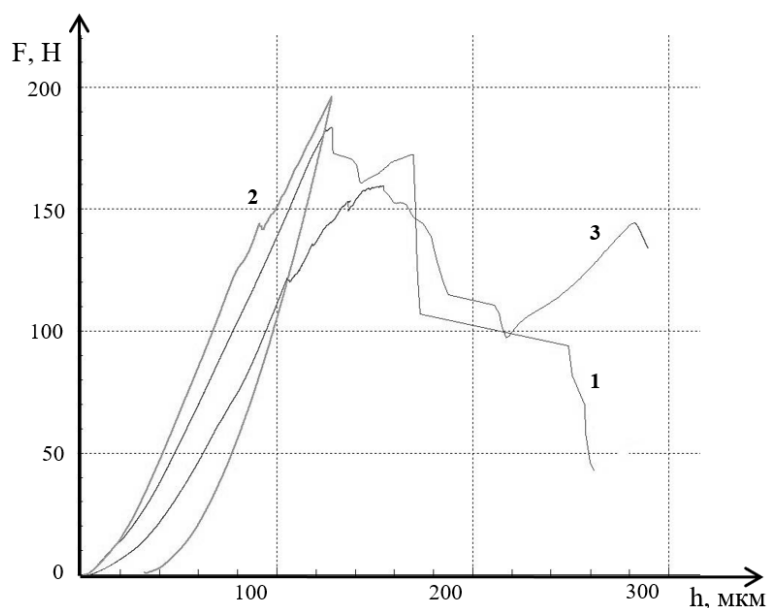


Рис.5. Характерные диаграммы деформирования при индентировании (на примере результатов испытаний образцов из ПКМ-1, толщиной 1,6 мм) в случае: 1 – сдвига (положительный результат, см. рис.2г); 2 – индентирования без сдвига (рис.2а); 3 – разрушения образца с образованием трещины (рис.2б).

Результаты проведенных испытаний показывают, что диаграммы сдвига имеют три характерных участка:

– квазилинейный участок упругого нагружения, на котором усилие выталкивания F линейно растет с увеличением глубины внедрения индентора h ;

– ступенчатый участок возникновения и развития разрушения с потерей энергии деформирования на развитие новых свободных поверхностей разрушения [43], представлен в виде резких падений усилия выталкивания F ;

– пологий участок скольжения с трением миниатюрного мультифиламентного цилиндра при его выталкивании из образца-шлифа.

Таким образом, разработанный метод испытаний на сдвиг методом индентирования позволяет определять предел прочности материала при сдвиге и получать диаграмму деформирования материала.

Метод является экономичным, так как толщина образцов не превышает 2 мм, что выгодно отличает его от методов определения прочности при сдвиге современными методами короткой балки и Иосипеску, где геометрия образцов существенно больше.

Метод испытаний на сдвиг методом индентирования достаточно прост и быстро реализуем, проводится на инструментальном твердомере и не требует сложной пробоподготовки, как в случае наноиндентирования единичного волокна [39,40].

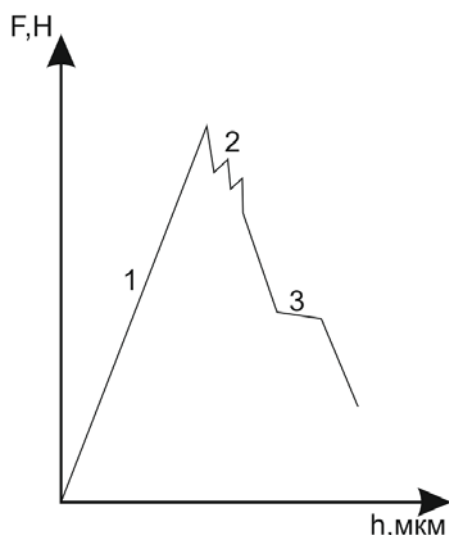


Рис.6. Характерная диаграмма сдвига ПКМ при индентировании.

В таблице 2 показано сравнение результатов испытаний на определение напряжения сдвига различными методами.

Таблица 2.

Напряжение сдвига, определенное различными методами.

Напряжение	ПКМ-1	ПКМ-2
Среднее напряжение сдвига, определенное методом наноиндентирования τ_n , МПа [41]	<u>105</u> 49 ÷ 165	<u>105</u> 85 ÷ 127
Среднее напряжение сдвига, определенное методом индентирования τ , МПа	<u>58</u> 55 ÷ 61	<u>53</u> 50 ÷ 56

Значения прочности при сдвиге τ , определенные по разработанному методу попадают в интервал значений прочности, определенной методом наноиндентирования с помощью выталкивания единичных волокон наноиндентором из утоненного образца полимерного композита.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный метод испытаний на сдвиг методом индентирования позволяет определять предел прочности материала при сдвиге и получать диаграмму деформирования материала.

Метод является экономичным, так как толщина образцов не превышает 2 мм, что выгодно отличает его от методов определения прочности при сдвиге современными методами: методом короткой балки и методом Иосипеску, которые требуют образцы больших размеров.

Метод испытаний на сдвиг методом индентирования достаточно прост и быстро реализуем, проводится на инструментальном твердомере и не требует сложной пробоподготовки, как в случае наноиндентирования единичного волокна.

Окончательный выбор оптимальной толщины образца требует набора статистических данных, как по количеству испытаний, так и по количеству материалов.

ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлин А.А. *Современные полимерные композиционные материалы* // Соросовский образовательный журнал. – 1995. – №1. – С.57-65.
2. Марков А.В., Власов С.В. *Принципы выбора полимерных материалов* // Полимерные материалы. – 2004. – №6(61). – С.17-19.
3. Болтон У. *Конструкционные материалы: металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты: карманный справочник* /пер. с англ. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2004. – 320 с.
4. Васильев В.В., Протасов В.Д., Болотин В.В. *Композиционные материалы: справочник*. – М.: Машиностроение, 1990. – 510 с.
5. Виноградов В.М., Кербер М.Л., Головкин Г.С. *Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология*. – М.: Профессия, 2008. – 560 с.
6. Берлин А.А., Вольфсон С.А., Ошмян В.Г. *Принципы создания композиционных материалов*. – М.: Химия, 1990. – 240 с.
7. Деев И.С., Каблов Е.Н., Кобец Л.П., Чурсова Л.В. *Исследование методом сканирующей электронной микроскопии деформации микрофазовой структуры полимерных матриц при механическом нагружении* // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2014. – №7. – Ст.06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 15.02.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-6-6.
8. Каблов Е.Н. *Композиты: сегодня и завтра* // Металлы Евразии. – 2015. – №1. – С.36-39.
9. Крыжановский В.К., Кербер М.Л., Бурлов В.В., Панيماتченко А.Д. *Технические свойства полимерных материалов*. – М.: Профессия, 2005. – 248 с.
10. Каблов Е.Н., Сагомонова В.А., Сорокин А.Е., Целикин В.В., Гуляев А.И. *Исследование структуры и свойств полимерного композиционного материала с интегрированным вибропоглощающим слоем* // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2020. – №3. – С.2-9.
11. Трофимов Н.Н., Канович М.З. *Основы создания полимерных композитов*. – М.: Наука, 2000. – 538 с.
12. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Юрков Г.Ю. *Перспективы использования углеродсодержащих наночастиц в связующих для полимерных*

- композиционных материалов // Российские нанотехнологии. – 2013. – Т.8. – №3-4. – С.24-42.*
13. Гуляев А.И., Журавлева П.Л. *Методологические вопросы анализа фазовой морфологии материалов на основе синтетических смол, модифицированных термопластами (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2015. – №6. – Ст.09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 30.05.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-6-9-9.*
 14. Кобец Л.П., Деев И.С. *Структурообразование в терморезактивных связующих и матрицах композиционных материалов на их основе // Российский химический журнал. – 2010. – Т.LIV. – №1. – С.67-78.*
 15. Гуляев А.И., Шуртаков С.В. *Количественный анализ микроструктуры граничного слоя «волокно–матрица» в углепластиках // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2016. – №7. – Ст.08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 4.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-8-8.*
 16. Гуляев А.И., Яковлев Н.О., Орешко Е.И. *Фрактографические признаки роста межслоевой трещины при нагружении углепластика по различным модам // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2019. – №12. – Ст.11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 30.05.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-99-108.*
 17. Генералов А.С., Бойчук А.С., Мурашов В.В. *Контроль прочности углепластиков на клеевых препрегах ультразвуковым методом // Клеи. Герметики. Технологии. – 2012. – №5. – С.27-31.*
 18. Афанасьев А.В., Рабинский Л.Н., Шершак П.В. *Экспериментальное определение деформационных и прочностных характеристик полимерных композиционных материалов // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2010. – Т.16. – №2. – С.214-222.*
 19. Шершак П.В. *Особенности национальной стандартизации методов испытаний полимерных композиционных материалов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. – 2019. – №2(74). – Ст.08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 11.02.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-77-88.*
 20. Гриневиц А.В., Нужный Г.А., Баканов А.В., Улькин М.Ю., Одинцев И.Н. *Оценка несущей способности элементов крепежа из полимерных композиционных материалов // Деформация и разрушение материалов. – 2015. – №12. – С.38-42.*
 21. Шершак П.В., Рябовол Д.Ю. *Стандарты по динамическим механическим испытаниям пластмасс и полимерных композитных материалов // Авиационная промышленность. – 2017. – №4. – С.46-52.*
 22. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Луценко А.Н. *Математическое моделирование деформирования конструкционного углепластика при изгибе // Авиационные материалы и технологии. – 2016. – №2(41). – С.50-59. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-50-59.*
 23. Бартенев Г.М., Зеленев Ю.В. *О методах испытания полимеров, позволяющих прогнозировать сроки их работоспособности // Механика полимеров. – 1971. – №2. – С.212-220.*
 24. Karger-Kocsis J., Mahmood H., Pegoretti A. *Recent advances in fiber/matrix interphase engineering for polymer composites // Progress in Materials Science. – 2015. – Vol.73. – Pp.1-43.*
 25. Гарифуллин А.Р., Абдуллин И.Ш. *Современное состояние проблемы поверхностной обработки углеродных волокон для последующего их*

- применения в полимерных композитах в качестве армирующего элемента // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – №7. – С.80-85.
26. Liu L., Jia C., He J., Zhao F., Fan D., Xing L., Wang M., Wang F., Jiang Z., Huang Y. *Interfacial characterization, control and modification of carbon fiber reinforced polymer composites* // Composites Science and Technology. – 2015. – Vol.121. – Pp.56-72.
 27. Kim J.-K., Mai Y.-W. *Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites*. – Oxford: Elsevier, 1998. – 486 p.
 28. Herrera-Franco P.J., Drzal L.T. *Comparison of methods for the measurement of fibre/matrix adhesion in composites* // Composites. – 1992. – Vol.23. – Pp.2-27.
 29. Горбаткина Ю.А., Иванова-Мумжиева В.Г., Куперман А.М. *Адгезия модифицированных эпоксидных матриц к армирующим волокнам* // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2016. – №5. – С.439-447.
 30. Zhandarov S., Mader E. *Characterization of fiber/matrix interface strength: applicability of different tests, approaches and parameters* // Composites Science and Technology. – 2005. – Vol.65. – Pp.149-160.
 31. Гуляев А.И. *Измерение адгезионной прочности «волокно–матрица» с применением наноиндентирования (обзор)* // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журнал. – 2019. – №3. – Ст.08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 05.07.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-8-8.
 32. Горбаткина Ю.А. *Адгезионная прочность в системах полимер-волокно*. – М.: Химия, 1987. – 192 с.
 33. Ильичев А.В., Раскутин А.Е., Гуляев И.Н. *Сравнение геометрических размеров образцов ПКМ, используемых в международных стандартах ASTM и отечественных ГОСТ* // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журнал. – 2015. – №4. – Ст.05. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения 04.03.2021).
 34. Зимин Д.Е., Ходакова Н.Н., Блазнов А.Н. *Экспериментально-теоретические исследования закономерностей формирования гибридных композиционных материалов*. Южно-Сибирский научный вестник. – 2018. – №3(23). – С.44-48.
 35. Лаптев М.Ю., Адамов А.А. *Оценка влияния геометрических и технологических факторов на напряженно-деформированное состояние образцов из полимерных композиционных материалов при испытаниях на изгиб и межслоевой сдвиг короткой балки* // Конструкции из композиционных материалов. – 2015. – №2. – С.10-14.
 36. Ильичев А.В., Губин А.М., Акмеев А.Р., Иванов Н.В. *Определение области максимальных сдвиговых деформаций для образцов углепластика по методу Иосипеску, с использованием оптической системы измерений* // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журнал. – 2018. – №6. – Ст.10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 10.03.2021). DOI: 10.18577/2071-6046-2018-0-6-99-109.
 37. Лаптев М.Ю., Адамов А.А. *Моделирование процессов деформирования полимерных композиционных материалов на основе тканевого препрега при испытаниях на изгиб и межслоевой сдвиг методом короткой балки* // Вычислительная механика сплошных сред. – 2015. – Т.8. – №3. – С.264-272.
 38. Гуляев А.И., Ерасов В.С., Орешко Е.И., Уткин Д.А. *Анализ разрушения углепластика при выталкивании мультифиламентного цилиндра* // Клеи. Герметики. Технологии. – 2021. – №1. – С.28-35.

39. Гуляев А.И., Яковлев Н.О., Орешко Е.И. *Фрактографические особенности межслоевого разрушения эпоксиполисульфонового углепластика* / IV Всероссийская научно-техническая конференция «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения». Материалы конференции. – М.: ФГУП «ВИАМ», 2019. – С.36-50.
40. Орешко Е.И., Уткин Д.А., Яковлев Н.О., Ерасов В.С. *Исследование процессов деформирования металлических и полимерных композиционных материалов при индентировании* // XII Всероссийская конференция по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» «Современные аспекты в области исследований структурно-фазовых превращений при создании материалов нового поколения». Материалы конференции. – М.: ФГУП «ВИАМ», 2020. – С.326-342.
41. Гуляев А.И., Медведев П.Н., Сбитнева С.В., Петров А.А. *Экспериментальное исследование по оценке адгезионной прочности волокно-матрица в углепластиках на основе эпоксидного связующего, модифицированного полисульфоном* // *Авиационные материалы и технологии*. – 2019. – №4. – С.80-86. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-80-86.
42. Орешко Е.И., Уткин Д.А., Ерасов В.С., Ляхов А.А. *Методы измерения твердости материалов (обзор)* // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журнал*. – 2020. – №1(85). – С.101-117. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 11.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-101-117.
43. Ерасов В.С., Орешко Е.И. *Деформация и разрушение как процессы изменения объема, площади поверхности и линейных размеров в нагружаемых телах* // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журнал*. – 2016. – №8(44). – Ст.11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 16.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-11-11.

REFERENCES

1. Berlin A.A. *Sovremennye polimernye kompozitsionnye materialy [Modern polymer composite materials]*. Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal, 1995, No.1, Pp.57-65.
2. Markov A.V., Vlasov S.V. *Printsipy vybora polimernykh materialov [Principles of the choice of polymer materials]*. Polimernye materialy, 2004, No.6(61), Pp.17-19.
3. Bolton U. *Konstruktsionnye materialy: metally, splavy, polimery, keramika, kompozity: karmannyj spravochnik [Constructional materials: metals, alloys, polymers, ceramics, composites: pocket reference book]*. Moskva, Izdatel'skij dom "Dodehka-XXI", 2004, 320 p.
4. Vasiliev V.V., Protasov V.D., Bolotin V.V. *Kompozitsionnye materialy: spravochnik [Composite materials: handbook]*. Moskva, Mashinostroenie, 1990, 510 p.
5. Vinogradov V.M., Kerber M.L., Golovkin G.S. *Polimernye kompozitsionnye materialy: struktura, svojstva, tekhnologiya [Polymer composite materials: structure, properties, technology]*. Moskva, Professiya, 2008, 560 p.
6. Berlin A.A., Wolfson S.A., Oshmyan V.G. *Printsipy sozdaniya kompozitsionnykh materialov [Principles of creating composite materials]*. Moskva, Khimiya, 1990, 240 p.
7. Deev I.S., Kablov E.N., Kobets L.P., Chursova L.V. *Issledovanie metodom skaniruyushhej ehlektronnoj mikroskopii deformatsii mikrofazovoj struktury polimernykh matrits pri mekhanicheskom nagruzhении [Investigation by scanning electron microscopy of the deformation of the microphase structure of polymer*

- matrices under mechanical loading*]. Trudy VIAM, ehlektronnyj nauchno-tehnicheskij zhurnal, 2014, No.7, Article 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (data obrashheniya 15.02.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-6-6.
8. Kablov E.N. *Kompozity: segodnya i zavtra [Composites: today and tomorrow]*. Metally Evrazii, 2015, No.1, Pp.36-39.
 9. Kryzhanovsky V.K., Kerber M.L., Burlov V.V., Panimatchenko A.D. *Tekhnicheskie svoystva polimernykh materialov [Technical properties of polymer materials]*. Moskva, Professiya, 2005, 248 p.
 10. Kablov E.N., Sagomonova V.A., Sorokin A.E., Tselikin V.V., Gulyaev A.I. *Issledovanie struktury i svoystv polimernogo kompozitsionnogo materiala s integrirovannym vibropogloshhayushhim sloem [Investigation of the structure and properties of a polymer composite material with an integrated vibration-absorbing layer]*. Vse materialy. Ehntsiklopedicheskij spravochnik, 2020, No.3, Pp.2-9.
 11. Trofimov N.N., Kanovich M.Z. *Osnovy sozdaniya polimernykh kompozitov [Fundamentals of creating polymer composites]*. Moskva, Nauka, 2000, 538 p.
 12. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Yurkov G.Yu. *Perspektivy ispol'zovaniya uglersoderzhashhikh nanochastits v svyazuyushhikh dlya polimernykh kompozitsionnykh materialov [Prospects for the use of carbon-containing nanoparticles in binders for polymer composite materials]*. Rossijskie nanotekhnologii, 2013, Vol.8, No.3-4, Pp.24-42.
 13. Gulyaev A.I., Zhuravleva P.L. *Metodologicheskie voprosy analiza fazovoy morfologii materialov na osnove sinteticheskikh smol, modifitsirovannykh termoplastami (obzor) [Methodological issues of analysis of phase morphology of materials based on synthetic resins modified with thermoplastics (review)]*. Trudy VIAM, ehlektronnyj nauchno-tehnicheskij zhurnal, 2015, No.6, Article 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (data obrashheniya 30.05.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-6-9-9.
 14. Kobets L.P., Deev I.S. *Strukturoobrazovanie v termoreaktivnykh svyazuyushhikh i matritsakh kompozitsionnykh materialov na ikh osnove [Structure formation in thermosetting binders and matrices of composite materials based on them]*. Rossijskij khimicheskij zhurnal, 2010, Vol.LIV, No.1, Pp.67-78.
 15. Gulyaev A.I., Shurtakov S.V. *Kolichestvennyj analiz mikrostruktury granichnogo sloya "volokno-matritsa" v ugleplastikakh [Quantitative analysis of the microstructure of the boundary layer "fiber-matrix" in carbon fiber plastics]*. Trudy VIAM, ehlektronnyj nauchno-tehnicheskij zhurnal, 2016, No.7, Article 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (data obrashheniya 04.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-8-8.
 16. Gulyaev A.I., Yakovlev N.O., Oreshko E.I. *Fraktograficheskie priznaki rosta mezhslonovoj treshhiny pri nagruzhении ugleplastika po razlichnym modam [Fractographic signs of interlayer crack growth under carbon fiber loading in different modes]*. Trudy VIAM, ehlektronnyj nauchno-tehnicheskij zhurnal, 2019, No.12, Article 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (data obrashheniya 30.05.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-99-108.
 17. Generalov A.S., Boychuk A.S., Murashov V.V. *Kontrol' prochnosti ugleplastikov na kleevykh prepregakh ul'trazvukovym metodom [Control of the strength of carbon fiber plastics on glue prepregs by ultrasonic method]*. Klei. Germetiki. Tekhnologii, 2012, No.5, Pp.27-31.
 18. Afanasyev A.V., Rabinsky L.N., Shershak P.V. *Ehksperimental'noe opredelenie deformatsionnykh i prochnostnykh kharakteristik polimernykh kompozitsionnykh*

materialov [Experimental determination of deformation and strength characteristics of polymer composite materials]. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii, 2010, Vol.16, No.2, Pp.214-222.

19. Shershak P.V. *Osobennosti natsional'noj standartizatsii metodov ispytaniy polimernykh kompozitsionnykh materialov [Features of the national standardization of test methods for polymer composite materials]*. Trudy VIAM, ehlektronnyj nauchno-tehnicheskij zhurnal, 2019, No.2(74), Article 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (data obrashheniya 11.02.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-77-88.
20. Grinevich A.V., Nuzhny G.A., Bakanov A.V., Ulkin M.Yu., Odintsovo I.N. *Otsenka nesushhej sposobnosti ehlementov krepезha iz polimernykh kompozitsionnykh materialov [Evaluation of the bearing capacity of fasteners made of polymer composite materials]*. Deformatsiya i razrushenie materialov, 2015, No.12, Pp.38-42.
21. Shershak P.V., Ryabovol D.Yu. *Standarty po dinamicheskim mekhanicheskim ispytaniyam plastmass i polimernykh kompozitnykh materialov [Standards for dynamic mechanical tests of plastics and polymer composite materials]*. Aviatsionnaya promyshlennost', 2017, No.4, Pp.46-52.
22. Oreshko E.I., Erasov V.S., Lutsenko A.N. *Matematicheskoe modelirovanie deformirovaniya konstruksionnogo ugleplastika pri izgibe [Mathematical modeling of structural carbon fiber plastic deformation in bending]*. Aviatsionnye materialy i tekhnologii, 2016, No.2(41), Pp.50-59. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-50-59.
23. Bartenev G.M., Zelenev Yu.V. *O metodakh ispytaniya polimerov, pozvolyayushhikh prognozirovat' sroki ikh rabotosposobnosti [About the methods of testing polymers, allowing to predict the terms of their performance]*. Mekhanika polimerov, 1971, No.2, Pp.212-220.
24. Karger-Kocsis J., Mahmood H., Pegoretti A. *Recent advances in fiber/matrix interphase engineering for polymer composites*. Progress in Materials Science, 2015, Vol.73, Pp.1-43.
25. Garifullin A.R., Abdullin I.S. *Sovremennoe sostoyanie problemy poverkhnostnoj obrabotki uglerodnykh volokon dlya posleduyushhego ikh primeneniya v polimernykh kompozitakh v kachestve armiruyushhego ehlementa [Current status of the problem of surface treatment of carbon fibers for subsequent application in polymer composites as reinforcing element]*. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta, 2014, No.7, Pp.80-85.
26. Liu L., Jia C., He J., Zhao F., Fan D., Xing L., Wang M., Wang F., Jiang Z., Huang Y. *Interfacial characterization, control and modification of carbon fiber reinforced polymer composites*. Composites Science and Technology, 2015, Vol.121, Pp.56-72.
27. Kim J.-K., Mai Y.-W. *Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites*. Oxford, Elsevier, 1998, 486 p.
28. Herrera-Franco P.J., Drzal L.T. *Comparison of methods for the measurement of fibre/matrix adhesion in composites*. Composites, 1992, Vol.23, Pp.2-27.
29. Gorbatkina Yu.A., Ivanova-Mumzhieva V.G., Kuperman A.M. *Adgeziya modifitsirovannykh ehpoksidnykh matrits k armiruyushhim voloknam [Adhesion of modified epoxy matrices to reinforcing fibers]*. Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A, 2016, No.5, Pp.439-447.
30. Zhandarov S., Mader E. *Characterization of fiber/matrix interface strength: applicability of different tests, approaches and parameters*. Composites Science and Technology, 2005, Vol.65, Pp.149-160.

31. Gulyaev A.I. *Izmerenie adgezionnoj prochnosti "volokno-matritsa" s primeneniem nanoindentirovaniya (obzor) [Measurement of adhesive strength "fiber-matrix" with the use of nanoindentation (review)]*. Trudy VIAM, ehlektronnyj nauchno-tekhnicheskij zhurnal, 2019, No.3, Article 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (data obrashheniya 05.07.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-8-8
32. Gorbatkina Yu.A. *Adgezionnaya prochnost' v sistemakh polimer-volokno [Adhesive strength in polymer-fiber systems]*. Moskva, Khimiya, 1987, 192 p.
33. Ilyichev A.V., Raskutin A.E., Gulyaev I.N. *Sravnienie geometricheskikh razmerov obraztsov PKM, ispol'zuemykh v mezhdunarodnykh standartakh ASTM i otechestvennykh GOST [Comparison of geometric dimensions of PCM samples used in international standards ASTM and domestic GOST]*. Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika: ehlektronnyj nauchno-tekhnicheskij zhurnal, 2015, No.4, Article 05. URL: <http://www.materialsnews.ru> (data obrashheniya 04.03.2021).
34. Zimin D.E., Khodakova N.N., Blaznov A.N. *Ehksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya zakonomernostej formirovaniya gibridnykh kompozitsionnykh materialov [Experimental and theoretical studies of the formation patterns of hybrid composite materials]*. Yuzhno-Sibirskij nauchnyj vestnik, 2018, No.3(23), Pp.44-48.
35. Laptev M.Yu., Adamov A.A. *Otsenka vliyaniya geometricheskikh i tekhnologicheskikh faktorov na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie obraztsov iz polimernykh kompozitsionnykh materialov pri ispytaniyakh na izgib i mezhsluevoj sdvig korotkoj balki [Evaluation of the influence of geometric and technological factors on the stress-strain state of samples made of polymer composite materials during tests for bending and interlayer shear of a short beam]*. Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov, 2015, No.2, Pp.10-14.
36. Ilyichev A.V., Gubin A.M., Akmeev A.R., Ivanov N.V. *Opreделение oblasti maksimal'nykh sdvigovykh deformatsij dlya obraztsov ugleplastika po metodu Iosipesku, s ispol'zovaniem opticheskoy sistemy izmerenij [Determination of the region of maximum shear deformations for carbon fiber samples by the Iosipescu method, using an optical measurement system]*. Trudy VIAM, ehlektronnyj nauchno-tekhnicheskij zhurnal, 2018, No.6, Article 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (data obrashheniya 10.03.2021). DOI: 10.18577/2071-6046-2018-0-6-99-109.
37. Laptev M.Yu., Adamov A.A. *Modelirovanie protsessov deformirovaniya polimernykh kompozitsionnykh materialov na osnove tkanevogo preprega pri ispytaniyakh na izgib i mezhsluevoj sdvig metodom korotkoj balki [Modeling of the deformation processes of polymer composite materials based on fabric prepreg during tests for bending and interlayer shear by the short beam method]*. Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred, 2015, Vol.8, No.3, Pp.264-272.
38. Gulyaev A.I., Erasov V.S., Oreshko E.I., Utkin D.A. *Analiz razrusheniya ugleplastika pri vytalkivanii mul'tifilamentnogo tsilindra [Analysis of the destruction of carbon fiber when pushing out a multifilament cylinder]*. Klei. Germetiki. Tekhnologii, 2021, No.1, Pp.28-35.
39. Gulyaev A.I., Yakovlev N.O., Oreshko E.I. *Fraktograficheskie osobennosti mezhsluevogo razrusheniya ehpoksisopolisul'fonovogo ugleplastika [Fractographic features of interlayer destruction of epoxy polysulfonic carbon fiber]*. IV Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Polimernye kompozitsionnye materialy i proizvodstvennye tekhnologii novogo pokoleniya", Materialy konferentsii, Moskva, FGUP "VIAM", 2019, Pp.36-50.

40. Oreshko E.I., Utkin D.A., Yakovlev N.O., Erasov V.S. *Issledovanie protsessov deformirovaniya metallicheskih i polimernykh kompozitsionnykh materialov pri indentirovanii* [Investigation of the deformation processes of metal and polymer composite materials during indentation]. XII Vserossiyskaya konferentsiya po ispytaniyam i issledovaniyam svoystv materialov "TestMat" "Sovremennye aspekty v oblasti issledovaniy strukturno-fazovykh prevrashhenij pri sozdanii materialov novogo pokoleniya", Materialy konferentsii, Moskva, FGUP "VIAM", 2020, Pp.326-342.
41. Gulyaev, A.I., Medvedev, P.N., Sbitnev S.V., Petrov A.A. *Ehksperimental'noe issledovanie po otsenke adgezionnoj prochnosti volokno-matritsa v ugleplastikakh na osnove ehpoksidnogo svyazuyushhego, modifitsirovannogo polisul'fonom* [Experimental study to evaluate the adhesion strength of the fiber-matrix ugleplastika based on epoxy resins modified with polysulfone]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2019, No.4, Pp.80-86. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-80-86.
42. Oreshko E.I., Utkin D.A., Erasov V.S., Lyakhov A.A. *Metody izmereniya tverdosti materialov (obzor)* [Methods of measuring the hardness of materials (review)]. *Trudy VIAM, ehlektronnyj nauchno-tekhnicheskij zhurnal*, 2020, No.1(85), Pp.101-117. URL: <http://viam-works.ru> (data obrashheniya 11.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-101-117.
43. Erasov V.S., Oreshko E.I. *Deformatsiya i razrushenie kak protsessy izmeneniya ob'ema, ploshhadi poverkhnosti i linejnykh razmerov v nagruzhaemykh telakh* [Deformation and destruction as processes of change of volume, surface area and linear dimensions in loaded bodies]. *Trudy VIAM, ehlektronnyj nauchno-tekhnicheskij zhurnal*, 2016, No.8(44), Article 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (data obrashheniya 16.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-11-11.

Поступила в редакцию 01 февраля 2021 года.

Сведения об авторах:

Орешко Евгений Игоревич – к.т.н., с.н.с., специалист по прочности материалов воздушного судна, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов», г. Москва, Россия; e-mail: 89639619741@mail.ru

Ерасов Владимир Сергеевич – к.т.н., в.н.с., специалист по прочности материалов воздушного судна, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов», г. Москва, Россия

Уткин Денис Антонович – техник, специалист по прочности материалов воздушного судна, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов», г. Москва, Россия

Яковлев Николай Олегович – к.т.н., нач.лаб., специалист по прочности материалов воздушного судна, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов», г. Москва, Россия