

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-76-86

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТРИКОТАЖНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ С МОДИФИЦИРОВАННОЙ СТРУКТУРОЙ (обзор)

Л.А. Пономаренко¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Рассматриваются механические свойства полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе трикотажных наполнителей с модифицированной структурой. Описаны специфические особенности структуры наполнителей и характер их влияния на механические свойства наполнителя и ПКМ. Особое внимание уделено трикотажу с дополнительными непроязанными углеволокнами и свойствам ПКМ на его основе. Для таких материалов прочность при растяжении находится в диапазоне от 767 до 1157 МПа, что сравнимо со значениями данной характеристики углепластиков на основе однонаправленных наполнителей.

Ключевые слова: механические свойства, поперечновязанный, плосковязанный кулирный трикотажный наполнитель для полимерного композиционного материала, непроязанные волокна, пресовые и плавающие петли, ластик

Для цитирования: Пономаренко Л.А. Механические свойства полимерных композиционных материалов на основе трикотажных наполнителей с модифицированной структурой (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 12 (118). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-76-86.

Scientific article

MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS BASED ON KNITTED FILLERS WITH MODIFIED STRUCTURE (review)

L.A. Ponomarenko¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The mechanical properties of polymer composite materials (PCM) based on knitted fillers with a modified structure are considered. The specific features of the structure of fillers and the nature of their influence on the mechanical properties of the filler and PCM are described. Particular attention is paid to knitwear with additional non-knitted carbon fibers and the properties of PCM based on it. For such materials, the tensile strength is in the range from 767 to 1157 MPa, which is comparable to the values of this characteristic of carbon fiber reinforced plastics based on unidirectional fillers.

Keywords: mechanical properties, cross-knitted, flat-knitted knitted filler for polymer composite material, non-knitted fibers, press and floating loops, eraser

For citation: Ponomarenko L.A. Mechanical properties of polymer composite materials based on knitted fillers with modified structure (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 12 (118), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-76-86.

Введение

В настоящее время для выработки наполнителей для полимерных композиционных материалов (ПКМ) конструкционного назначения применяют волокна различного типа, в том числе смешанного состава [1–5]. Существует множество методов переработки волокна в полотно. Самые распространенные среди них – плетение и ткачество [6], реже применяются вязание и создание нетканого наполнителя. Для получения нагруженных конструкций широко используют плетеные и тканые наполнители для композиционных материалов. Вязаные и нетканые наполнители существенно уступают им по механическим свойствам, однако обладают другими преимуществами. Так, улучшению механических свойств ПКМ на основе трикотажных наполнителей может способствовать модификация структуры вязаного полотна в процессе выработки.

В последние годы в лабораториях всего мира, и в частности в лабораториях Российской Федерации, ведутся работы по исследованию механических свойств ПКМ на основе трикотажного полотна. Так, в статье [7] приведены результаты исследования влияния условий охлаждения на изменение прочности при изгибе термопластичных полипропиленовых композитов, армированных арамидным и стекловолоконным трикотажем. Результаты испытаний показали, что прочность при изгибе больше в направлении петельных столбиков трикотажного переплетения, чем в направлении петельных рядов. В работе [8] исследовано влияние объемной доли волокна на прочность при разрыве ламинированных ПКМ, армированных трикотажем из углеродного волокна. Анализ результатов испытаний свидетельствует, что предел прочности при растяжении возрастает с увеличением объемной доли волокна. В работах [9–11] исследованы механизмы разрушения трехмерных многоосных основовязаных углеродно-эпоксидных композитов при нагрузках на растяжение, сжатие, трехточечный изгиб и сдвиг. Установлено, что трикотажные армирующие ткани незначительно влияют на поведение конструкций из полимерных композитов при статических нагрузках, таких как растяжение и сжатие. Кроме того, сделано предположение, что именно трикотажные наполнители оказывают влияние на механизм развития трещин. По этой причине следует выявить характер и механизм разрушения ламинированных композиционных материалов, армированных трикотажной тканью. В то же время петлевая структура трикотажного полотна дает возможность поглощать больше энергии, а полотно имеет более высокую вязкость разрушения и большую технологичность для формирования сложной формы изделия [12].

В работе [13] изучено межслойное разрушение ПКМ, армированных кулирным трикотажем из стекловолокна, с учетом влияния его объемного содержания и структуры вязаного наполнителя. Оценена также межслоевая вязкость разрушения образцов, усиленных алюминиевыми полосами. Результаты исследования показали, что значения трещиностойкости для композиционных материалов на основе трикотажа приблизительно в 10 или 20 раз больше значений для ПКМ на основе тканого наполнителя, а скорость выделения энергии увеличивается с уменьшением объемной доли волокна в трикотажных композитах. В то же время следует отметить повышенную устойчивость композиционных материалов на основе трикотажных наполнителей к ударным нагрузкам [14].

Цель данной работы – анализ теоретических и практических результатов исследования механических свойств пластиков с наполнителями на основе плосковязаного трикотажа с модифицированной структурой.

Влияние частично провязанных волокон, введенных в структуру трикотажного наполнителя, на механические свойства композиционного материала

В работе [15] показано, что увеличение прочности ПКМ на основе плосковязаного (кулирного) трикотажа с модифицированной структурой улучшает механические свойства

трикотажного полотна, дополненного частично провязываемыми нитями, формирующими прессовые или плавающие петли. Основной характеристикой прессовых и плавающих петель, позволяющих оценивать такие свойства трикотажа, является модуль петли, который определяется через отношение длины волокна в петле к его диаметру [16].

В зависимости от величины модуля петли, устанавливаемой в процессе выработки трикотажного полотна, можно получить структуру с разной степенью разреженности, влияющей на прочностные характеристики полотна. Таким образом, варьирование модуля петли трикотажного наполнителя композиционного материала на основе эпоксидного связующего приводит к повышению весовой эффективности ПКМ, наиболее существенные изменения которой наблюдаются при достижении значения модуля петли, равного 60 ед. и более [17]. Характерная зависимость весовой эффективности от модуля петли приведена на рис. 1.

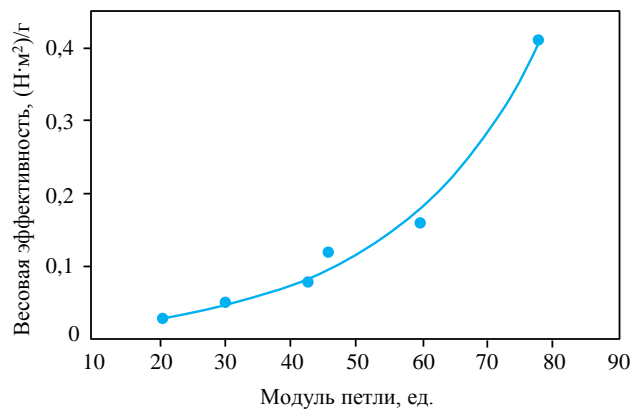


Рис. 1. Зависимость весовой эффективности полимерного композиционного материала от модуля петли трикотажного наполнителя [17]

В работе [18] приведены данные о деформации полимерного композита на основе эпоксидной матрицы и трикотажных наполнителей с плавающими петлями, выработанными из стекло-, угле- и базальтового волокна (рис. 2). Для сравнения результатов сгруппированы данные о растяжении образцов на основе трикотажа с одним (P1), двумя (P2), тремя (P3) дополнительными частично провязанными волокнами и без них (P0), а также представлены результаты испытаний образца отвержденного эпоксидного связующего марки SICOMIN SR 1710 с отвердителем марки SD 8822.

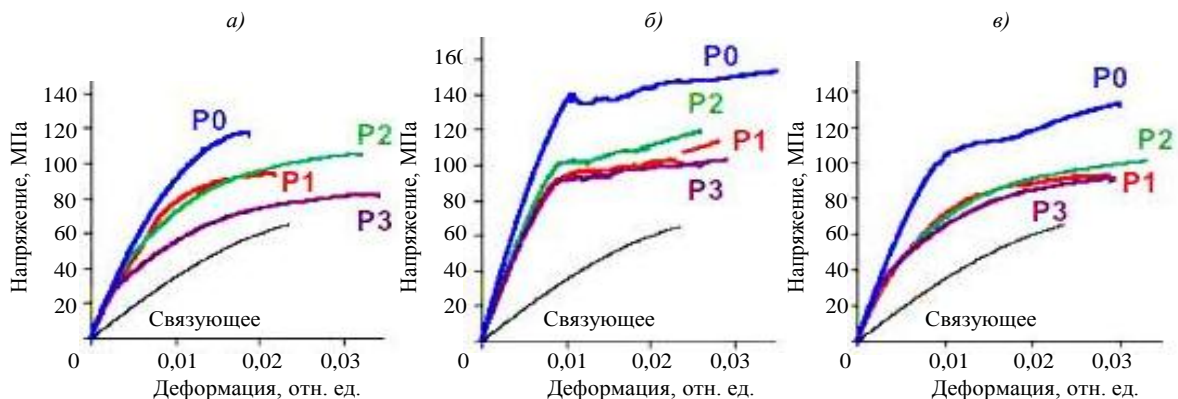


Рис. 2. Кривые нагружения («напряжение–деформация») при растяжении образцов из полимерного композиционного материала на основе стекло- (а) и углеволоконного трикотажа (б), а также на основе трикотажа, выработанного из базальтового волокна (в) [18]

Из данных, приведенных на рис. 2, видно, что при растяжении деформационные характеристики образцов значительно различаются вследствие отличий по структуре ткани и типу волокна. Но в то же время во всех случаях у образцов на основе трикотажа с введением частично провязанных волокон происходит снижение деформативности и увеличение весовой эффективности ПКМ. С повышением количества дополнительно введенных частично провязанных волокон в структуру трикотажного наполнителя наблюдается незначительное изменение деформативности и модуля упругости образцов из ПКМ. При этом увеличение модуля упругости полимерных композитов происходит при растяжении образца в направлении, совпадающем с направлением введенных дополнительных частично провязанных волокон в структуру трикотажного наполнителя [18, 19].

С увеличением плотности плавающих петель наблюдается уменьшение напряжения. При этом модификация структуры трикотажного наполнителя (плотность плавающих петель и длина петли) улучшает свойства трикотажных полотен, выработанных из одного их типа, при приложении деформирующего воздействия вдоль петельных столбиков.

Таким образом, увеличение количества плавающих петель на 1 ед. площади полотна снижает расход волокна при вязании, а также улучшает механические характеристики композиционных материалов на основе трикотажных наполнителей, любое изменение в структуре и составе которых способствует изменению деформации, особенно при увеличении или уменьшении длины петли.

Проанализированы также результаты изменения модуля упругости для ПКМ на основе наполнителей, выработанных из волокон различного состава. Данный модуль определяется как отношение между напряжением (прочностью на 1 ед. площади) и деформацией и необходим для количественной оценки жесткости твердого материала. Установлено, что модуль упругости прямо пропорционален длине петли [20].

Таким образом, увеличение количества плавающих петель на 1 ед. площади полотна и особенно уменьшение длины петли способствуют повышению механических характеристик ПКМ на основе трикотажных наполнителей.

Кроме того, наличие плавающих петель в структуре трикотажного наполнителя в определенной степени способствует увеличению деформации композиционного материала.

При приложении деформирующего воздействия на ПКМ вдоль петельных рядов наполнителя влияние длины петли оказывается преобладающим фактором в увеличении и уменьшении деформации по сравнению с влиянием состава и структуры трикотажного наполнителя.

Следует отметить, что наличие плавающих петель в структуре трикотажных наполнителей композиционных материалов способствует увеличению модуля упругости, т. е. повышению жесткости материала и в направлении петельных рядов наполнителя.

Увеличение количества плавающих петель в структуре трикотажных наполнителей ПКМ также способствует повышению модуля упругости материала. Таким образом, любое изменение структуры трикотажного наполнителя (добавление плавающих петель и особенно увеличение или уменьшение длины петли) приводит к изменению данного модуля [21].

Влияние дополненных непровязанных волокон в структуре трикотажного полотна на механические свойства композиционных материалов

Наиболее распространенным наполнителем с непровязанными волокнами является так называемый многослойный двухосный кулирный трикотаж, структура которого

может состоять из разного количества слоев, а число непровязанных волокон варьируется в зависимости от требуемых характеристик. В то же время в структуре многослойного двухосного трикотажа все непровязанные волокна располагаются строго прямо и параллельно друг другу [22, 23]. Такой вид трикотажного наполнителя не только обладает свойствами и характеристиками однонаправленных тканей, но и наделен драпируемостью и деформативностью плосковязаного (кулирного) трикотажа [15].

На рис. 3 приведены зависимости прочности при сжатии от объемной доли непровязанного углеродного волокна (для образцов разной толщины).

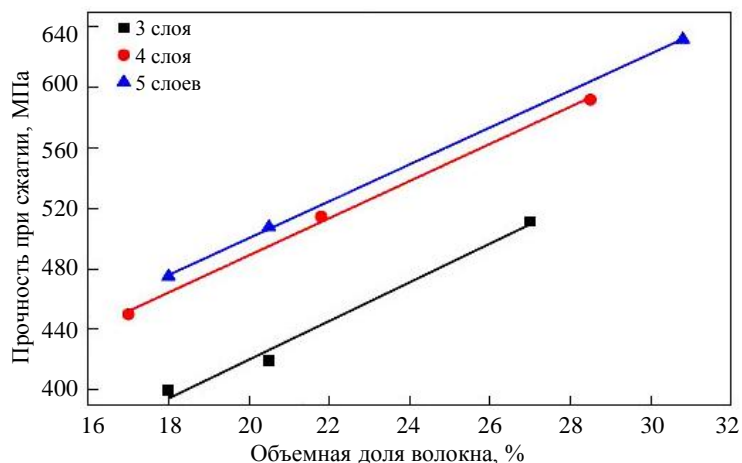


Рис. 3. Зависимости прочности при сжатии от объемной доли непровязанного углеродного волокна (для образцов различной толщины) [24]

Теоретически при одинаковой объемной доле волокна в различных образцах должна наблюдаться и одинаковая прочность при сжатии, но в реальном эксперименте этого не происходит в связи с влиянием трикотажной составляющей в структуре ПКМ. Из данных, представленных на рис. 3, видно, что чем больше количество слоев, каждый из которых имеет трикотажную составляющую, тем выше прочность при одинаковой объемной доле углеродного волокна [24, 25].

В работе [26] также исследована прочность ПКМ на основе трикотажного наполнителя с непровязанными волокнами и установлено, что увеличение объемной доли непровязанного волокна в составе трикотажного наполнителя позволяет повысить жесткость и прочность композиционного материала.

В статье [27] приведены результаты исследований механических свойств ПКМ на основе плосковязаного трикотажного наполнителя с дополнительными углеродными волокнами, для которого при проведении испытаний на прочность при растяжении получены значения, достигающие 1157 МПа, что сопоставимо со значениями для композиционных материалов на основе однонаправленных углеродных наполнителей.

Так, в работе [28] подтверждено повышение прочности при растяжении и для добавленных в структуру плосковязаного (кулирного) трикотажа льняных волокон (рис. 4).

Следует отметить, что тенденция к повышению прочности плосковязаного (кулирного) трикотажа при введении непровязанных волокон сохраняется. Об этом свидетельствуют результаты проведенных исследований как для высокопрочных углепластиков для ответственных конструкций, так и для пластиков, предназначенных для малонагруженных экосовместимых конструкций.

При исследовании механических свойств ПКМ на основе термопластичного связующего и трикотажного наполнителя, выработанного из смешанных арамидных и

нейлоновых волокон в различном соотношении, установлено, что с повышением содержания непровязанных нейлоновых волокон в трикотаже прочность при растяжении увеличивается линейно и при достижении максимальных значений образец полностью разрушается. Однако с увеличением содержания непровязанных арамидных волокон прочность при растяжении также возрастает линейно с повышением нагрузки, но после достижения максимальных значений данная характеристика снижается плавно до полного разрушения образца [29]. При этом ПКМ на основе трикотажного наполнителя с добавлением непровязанных нейлоновых волокон имеют прочность при растяжении в 3 раза более высокую по сравнению с прочностью образцов на основе трикотажа с добавлением непровязанных арамидных волокон.

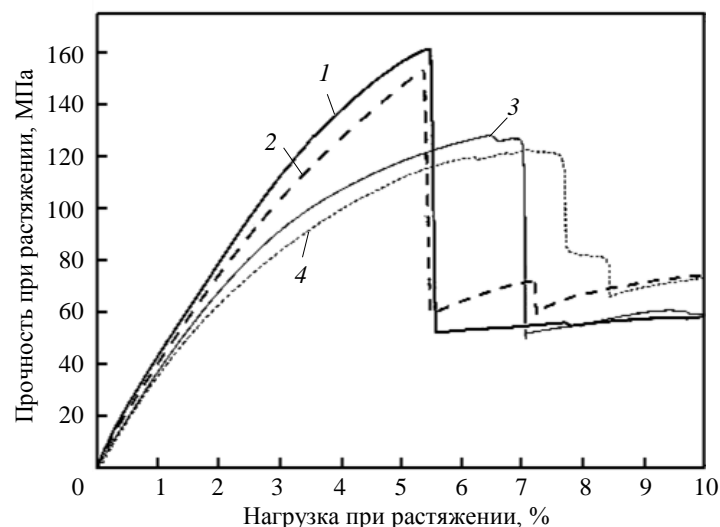


Рис. 4. Кривые зависимости прочности при растяжении вдоль петельных рядов с обработкой NaOH (1) и без нее (3) и вдоль петельных столбиков с обработкой NaOH (2) и без нее (4) от нагрузки для льняных волокон, добавленных в структуру плосковязаного (кулирного) трикотажа [28]

Таким образом, добавление непровязанных волокон в структуру плосковязаного трикотажного наполнителя позволяет приблизить значения механических свойств композиционного материала к показателям свойств ПКМ на основе однонаправленных наполнителей.

Влияние структуры и особенностей трикотажного наполнителя ластичного типа на механические свойства композиционного материала

Трикотажный наполнитель ластичного типа, применяемый для армирования ПКМ, представляет собой трикотаж с переплетением типа ластик 1 + 1 с модулем петли от 20 до 80. После пропитки эпоксидной смолой такого трикотажного наполнителя, выработанного из хлопчатобумажных волокон, проведены испытания образцов из композиционного материала. Результаты испытаний показали, что одним из самых важных критериев прочности полимерного композита является высота петельного ряда (рис. 5). С увеличением высоты петельного ряда в структуре трикотажа происходит изменение прочности при растяжении ПКМ. Данная зависимость характерна для квазинепрерывных однонаправленных наполнителей [17, 30–32].

В то же время следует отметить, что при использовании в качестве наполнителя трикотажа со структурой ластичного типа с высотой петельного ряда от 60 до 80 отн. ед.

более ярко выражена анизотропия свойств полимерного композита, что является следствием повышения объемной доли волокон, ориентированных в трикотажном полотне, и выражается функцией структуры и параметров вязания, например плотности петель. Таким образом, управление свойствами ПКМ возможно путем подбора параметров выработки трикотажных наполнителей, таких как длина петли и плотность петель [33].

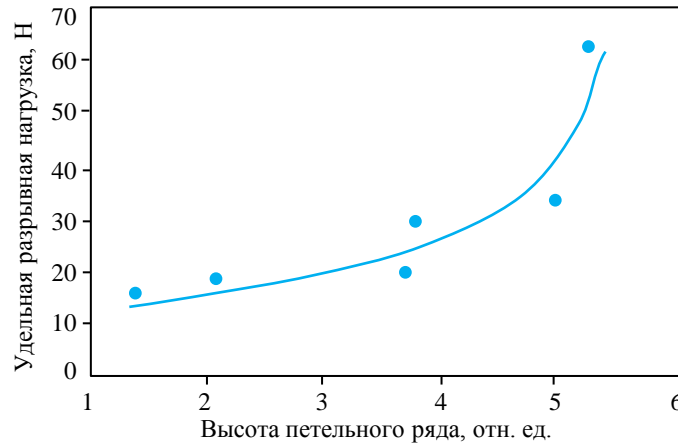


Рис. 5. Зависимость удельной разрывной нагрузки полимерного композиционного материала от высоты петельного ряда трикотажного наполнителя [32]

Разрушение композиционных материалов на основе вязаных наполнителей является сложным процессом, при котором точки пересечения волокон и изогнутые боковые палочки вязаных петель являются критическими точками, где происходит разрушение. При разрушении ПКМ также наблюдается значительное образование микротрещин в результате расслоения волокон трикотажного наполнителя и матрицы в критических точках.

Заключения

Механические свойства ПКМ на основе плосковязаного (кулирного) трикотажа с модифицированной структурой имеют ряд особенностей, проявляют анизотропный характер и в большей степени зависят от направления приложения деформирующего усилия.

Так, результаты испытаний композиционных материалов на основе трикотажных наполнителей, содержащих в структуре плавающие и прессовые петли, указывают на значительное влияние длины плавающих петель на механические свойства – повышение характеристик наблюдается при увеличении длины петли.

Введение дополнительных непрояванных волокон в структуру трикотажного наполнителя наделяет ПКМ механическими свойствами, приближенными к характеристикам композиционного материала на основе однонаправленных тканей.

Трикотажные наполнители ластичного типа, применяемые для армирования ПКМ, способствуют повышению прочностных характеристик благодаря варьированию высоты петельного ряда и приближению значений механических свойств полученного материала к значениям свойств полимерных композитов на основе квазинепрерывных однонаправленных наполнителей. Кроме того, такие наполнители приводят к улучшению механических характеристик композиционных материалов и за счет некоторого уменьшения плотности петель: они создают разреженную структуру с длинными петлями, также имитирующими квазинепрерывные однонаправленные наполнители.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
2. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // Вестник РФФИ. 2017. № 3. С. 97–105.
3. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
4. Каблов Е.Н., Кулагина Г.С., Железина Г.Ф., Лонский С.Л., Куршев Е.В. Исследование микроструктуры однонаправленного органопластика на основе арамидных волокон Русар-НТ и эпоксидно-полисульфонового связующего // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 19–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-19-26.
5. Курносков А.О., Вавилова М.И., Мельников Д.А. Технологии производства стеклянных наполнителей и исследование влияния аппретирующего вещества на физико-механические характеристики стеклопластиков // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 1 (50). С. 64–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-64-70.
6. Белинис П.Г., Донецкий К.И., Лукьяненко Ю.В., Рогожников В.Н., Майер Ю., Быстрикова Д.В. Объемно-армирующие цельнотканые преформы для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 4 (57). С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-18-26.
7. Cuong N.K., Yamane H., Maekawa Z. Mechanical properties of knitted fabric reinforced polypropylene composites // *Advanced Composite Materials*. 2000. Vol. 9. P. 25–35. DOI: 10.1163/156855100300132947.
8. Qi Y., Li J., Liu L. Tensile properties of multilayer-connected biaxial weft knitted fabric reinforced composites for carbon fibers // *Materials & Design (1980–2015)*. 2014. Vol. 54. P. 678–685. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.08.051.
9. Li D.-S., Xia Y., Zhou Q. et al. Experimental study on the mechanical behavior and failure mechanism of 3d MWK carbon/epoxy composites under quasi-static loading // *Polymer Composites*. 2016. Vol. 37. Is. 12. P. 3486–3498. DOI: 10.1002/pc.23548.
10. Li D.-S., Zhao C., Jiang L., Jiang N. Experimental study on the bending properties and failure mechanism of 3D integrated woven spacer composites at room and cryogenic temperature // *Composite Structures*. 2014. Vol. 111. P. 56–65. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.12.026.
11. Jiang D., Hu X., Lin Zh. et al. Mechanical properties and crystallization behaviors of oriented electrospun nanofibers of zein/poly(ϵ -caprolactone) composites // *Polymer Composites*. 2018. Vol. 39. P. 2151–2159. DOI: 10.1002/pc.24180.
12. Leong K.H., Ramakrishna S., Huang Z.M., Bibo G.A. The potential of knitting for engineering composites – a review // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2000. Vol. 31. Is. 3. P. 197–220. DOI: 10.1016/S1359-835X(99)00067-6.
13. Kim K.-Y., Curiskis J. I., Ye L., Fu Sh.-Y. Mode-I interlaminar fracture behaviour of weft-knitted fabric reinforced composites // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2005. Vol. 36. Is. 7. P. 954–964. DOI: 10.1016/j.compositesa.2004.12.004.
14. Hasanalizadeh F., Dabiryan H., Sadighi M. Low-velocity impact behavior of weft-knitted spacer fabrics reinforced composites based on energy absorption // 17th World Textile Conference (AUTEX 2018). IOP Conf. Series: Materials science and Engineering. 2017. Vol. 254. Art. 042014. DOI: 10.1088/1757-899X/254/4/042014.
15. Пономаренко Л.А. О способах модификации структуры трикотажных наполнителей для полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 3 (109). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-54-63.
16. Далидович А.С. Основы теории вязания. М.: Легкая индустрия, 1970. 432 с.
17. Труевцев А.В., Цобкалло Е.С., Москалюк О.А. Квазинепрерывное армирование композита кулирным трикотажем // *Технология легкой промышленности*. 2016. № 1. С. 64–67.
18. Balea L., Dusserre G., Bernhart G. Mechanical behaviour of plain-knit reinforced injected composites: effect of inlay yarns and fiber type // *Composites. Part B*. 2014. No. 56. P. 20–29. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.07.028.

19. Dusserre G., Balea L., Bernhart G. Elastic properties prediction of a knitted composite with inlaid yarns subjected to stretching: A coupled semi-analytical model // *Composites. Part A: Applied science and manufacturing*. 2014. No. 64. P. 185–193. DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.05.007.
20. De Araujo M., Fangueiro R., Hu H. Weft-knitted structures for Industrial applications // *Advances in Knitting Technology*. Woodhead Publishing Ltd, 2011. P. 136–170. DOI: 10.1533/9780857090621.2.136.
21. Zilio L., Dias M., Santos T. et al. Characterization and statistical analysis of the mechanical behavior of knitted structures used to reinforce composites: yarn compositions and float stitches // *Journal of materials research and technology*. 2020. No. 9 (4). P. 8323–8336. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.05.089.
22. Hu J.L., Jiang Y.M., Ko K.F. Modeling uniaxial tensile properties of multiaxial warp knitted fabric // *Textile Research Journal*. 1998. Vol. 68. P. 828–834. DOI: 10.1177/004051759806801107.
23. Vuure A.W., Ko K.F., Beevers C. Net-shape knitting for complex composite performs // *Textile Research Journal*. 2003. Vol. 73. P. 1–10. DOI: 10.1177/004051750307300101.
24. Pei X., Shang B., Chen L. et al. Compression properties of multilayer-connected biaxial weft knitted carbon fiber fabric reinforced composites // *Composites. Part B*. 2016. Vol. 91. P. 296–305. DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.12.041.
25. Gunes K.S., Ince M.E., Icoglu H.I. Compressibility of weft knitted reinforcement fabrics from glass yarn // 18th World Textile Conference (AUTEX 2018). IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. No. 460. P. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/460/1/012029.
26. Ishmael N., Fernando A. Textile technologies for the manufacture of three-dimensional textile preforms // *Research Journal of Textile and Apparel*. 2017. Vol. 21. No. 4. P. 342–362. DOI: 10.1108/RJTA-06-2017-0034.
27. Bezsmertna V., Mazna O., Kohanyiy V. et al. Multifunctional polymer-based composite materials with weft-knitted carbon fibrous fillers // *MATEC Web of Conferences*. 2019. No. 304. Art. 01012. DOI: 10.1051/mateconf/201930401012.
28. Xue D., Hu H. Mechanical properties of biaxial weft-knitted flax composites // *Materials and design*. 2012. No. 46. P. 264–269. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.10.019.
29. Demirkan O., Hamada Y., Kosui T., Nakai A. Effect of stitch yarn on tensile properties of biaxial weft knitted thermoplastic composites // *ECCM 15th European Conference on Composite Materials*. Venice, 2012. P. 1–5.
30. Молоснов К.А. Разработка трикотажных полотен для армирования композиционных материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2013. 17 с.
31. Труевцев А.В., Цобкалло Е.С., Москалюк О.А. Полимерные композиционные материалы с трикотажным наполнителем // *Современные тенденции развития химии и технологии полимерных материалов: тезисы докладов IV Междунар. науч. конф.* СПб., 2018. С. 57–59.
32. Базанова Е.А., Труевцев А.В. О возможности использования кулирного трикотажа в качестве наполнителя композитов // *Молодые ученые – развитию национальной технологической инициативы (ПОИСК)*. 2020. № 1. С. 21–23.
33. *Composite Materials for Aircraft Structures* // ALAA Education series / ed. by A. Baker, S. Dutton, D. Kelly. Second Edition. Blacksburg, 2004. 540 p.

References

1. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
2. Kablov E.N. Formation of domestic space materials science. *Vestnik RFFI*, 2017, no. 3, pp. 97–105.
3. Raskutin A.E. Russian polymer composite materials of new generation, their exploitation and implementation in advanced developed constructions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
4. Kablov E.N., Kulagina G.S., Zhelezina G.F., Lonskii S.L., Kurshev E.V. Microstructure research of the unidirectional organoplastic based on Rusar-NT aramid fibers and epoxy-polysulfone binder. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 19–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-19-26.

5. Kurnosov A.O., Vavilova M.I., Melnikov D.A. Manufacturing technologies of glass fillers and study of effects of finishing material on physical and mechanical properties of fiberglass plastics. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 1 (50), pp. 64–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-64-70.
6. Belinis P.G., Donetskiy K.I., Lukyanenko Yu.V., Rogozhnikov V.N., Mayer Yu., Bystrikova D.V. Volume reinforcing solid-woven preforms for manufacturing of polymer composite materials (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-18-26.
7. Cuong N.K., Yamane H., Maekawa Z. Mechanical properties of knitted fabric reinforced polypropylene composites. *Advanced Composite Materials*, 2000, vol. 9, pp. 25–35. DOI: 10.1163/156855100300132947.
8. Qi Y., Li J., Liu L. Tensile properties of multilayer-connected biaxial weft knitted fabric reinforced composites for carbon fibers. *Materials & Design (1980–2015)*, 2014, vol. 54, pp. 678–685. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.08.051.
9. Li D.-S., Xia Y., Zhou Q. et al. Experimental study on the mechanical behavior and failure mechanism of 3d MWK carbon/epoxy composites under quasi-static loading. *Polymer Composites*, 2016, vol. 37, is. 12, pp. 3486–3498. DOI: 10.1002/pc.23548.
10. Li D.-S., Zhao C., Jiang L., Jiang N. Experimental study on the bending properties and failure mechanism of 3D integrated woven spacer composites at room and cryogenic temperature. *Composite Structures*, 2014, vol. 111, pp. 56–65. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.12.026.
11. Jiang D., Hu X., Lin Zh. et al. Mechanical properties and crystallization behaviors of oriented electrospun nanofibers of zein/poly(ϵ -caprolactone) composites. *Polymer Composites*, 2018, vol. 39, pp. 2151–2159. DOI: 10.1002/pc.24180.
12. Leong K.H., Ramakrishna S., Huang Z.M., Bibo G.A. The potential of knitting for engineering composites – a review. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2000, vol. 31, is. 3, pp. 197–220. DOI: 10.1016/S1359-835X(99)00067-6.
13. Kim K.-Y., Curiskis J. I., Ye L., Fu Sh.-Y. Mode-I interlaminar fracture behaviour of weft-knitted fabric reinforced composites. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2005, vol. 36, is. 7, pp. 954–964. DOI: 10.1016/j.compositesa.2004.12.004.
14. Hasanalizadeh F., Dabiryan H., Sadighi M. Low-velocity impact behavior of weft-knitted spacer fabrics reinforced composites based on energy absorption. *17th World Textile Conference (AUTEX 2018). IOP Conf. Series: Materials science and Engineering*, 2017, vol. 254, art. 042014. DOI: 10.1088/1757-899X/254/4/042014.
15. Ponomarenko L.A. About ways of structure modification of a knitted fillers for polymeric composite materials (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 3 (109), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 02, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-54-63.
16. Dalidovich A.S. *Fundamentals of the theory of knitting*. Moscow: Light industry, 1970, 432 p.
17. Truevtsev A.V., Tsobkallo E.S., Moskalyuk O.A. Quasi-continuous reinforcement of the composite with knitwear. *Tekhnologiya legkoy promyshlennosti*, 2016, no. 1, pp. 64–67.
18. Balea L., Dusserre G., Bernhart G. Mechanical behaviour of plain-knit reinforced injected composites: effect of inlay yarns and fiber type. *Composites. Part: B*, 2014, no. 56, pp. 20–29. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.07.028.
19. Dusserre G., Balea L., Bernhart G. Elastic properties prediction of a knitted composite with inlaid yarns subjected to stretching: A coupled semi-analytical model. *Composites. Part A: Applied science and manufacturing*, 2014, no. 64, pp. 185–193. DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.05.007.
20. De Araujo M., Fangueiro R., Hu H. Weft-knitted structures for Industrial applications. *Advances in Knitting Technology*, Woodhead Publishing Ltd, 2011, pp. 136–170. DOI: 10.1533/9780857090621.2.136.
21. Zilio L., Dias M., Santos T. et al. Characterization and statistical analysis of the mechanical behavior of knitted structures used to reinforce composites: yarn compositions and float stitches. *Journal of materials research and technology*, 2020, no. 9 (4), pp. 8323–8336. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.05.089.

22. Hu J.L., Jiang Y.M., Ko K.F. Modeling uniaxial tensile properties of multiaxial warp knitted fabric. *Textile Research Journal*, 1998, vol. 68, pp. 828–834. DOI: 10.1177/004051759806801107.
23. Vuure A.W., Ko K.F., Beevers C. Net-shape knitting for complex composite performs. *Textile Research Journal*, 2003, vol. 73, pp. 1–10. DOI: 10.1177/004051750307300101.
24. Pei X., Shang B., Chen L. et al. Compression properties of multilayer-connected biaxial weft knitted carbon fiber fabric reinforced composites. *Composites. Part. B*, 2016, vol. 91, pp. 296–305. DOI: 10/1016/j/compositesb.2015.12.041.
25. Gunes K.S., Ince M.E., Icoglu H.I. Compressibility of weft knitted reinforcement fabrics from glass yarn. *18th World Textile Conference (AUTEX 2018). IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2018, no. 460, pp. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/460/1/012029.
26. Ishmael N., Fernando A. Textile technologies for the manufacture of three-dimensional textile preforms. *Research Journal of Textile and Apparel*, 2017, vol. 21, no. 4, pp. 342–362. DOI: 10.1108/RJTA-06-2017-0034.
27. Bezsmertna V., Mazna O., Kohanyiy V. et al. Multifunctional polymer-based composite materials with weft-knitted carbon fibrous fillers. *MATEC Web of Conferences*, 2019, no. 304, art. 01012. DOI: 10.1051/mateconf/201930401012.
28. Xue D., Hu H. Mechanical properties of biaxial weft-knitted flax composites. *Materials and design*, 2012, no. 46, pp. 264–269. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.10.019.
29. Demirkan O., Hamada Y., Kosui T., Nakai A. Effect of stitch yarn on tensile properties of biaxial weft knitted thermoplastic composites. *ECCM 15th European Conference on Composite Materials*, Venice, 2012, pp. 1–5.
30. Molosnov K.A. *Development of knitted fabrics for reinforcing composite materials*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). St. Petersburg, 2013, 17 p.
31. Truevtsev A.V., Tsobkallo E.S., Moskalyuk O.A. Polymer composite materials with knitted filler. *Modern trends in the development of chemistry and technology of polymeric materials*: abstracts of the IV Intern. scientific conf. St. Petersburg, 2018, pp. 57–59.
32. Bazanova E.A., Truevtsev A.V. On the possibility of using knitwear as a filler for composites. *Molodye uchenye – razvitiyu natsional'noy tekhnologicheskoy initsiativy (POISK)*, 2020, no. 1, pp. 21–23.
33. Composite Materials for Aircraft Structures. *ALAA Education series*. Ed. A. Baker, S. Dutton, D. Kelly. Second Edition. Blacksburg, 2004, 540 p.

Информация об авторах

Пономаренко Леся Алексеевна, ведущий инженер, к.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Lesya A. Ponomarenko, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Phys. & Math.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 03.08.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 08.08.2022.
The article was submitted 03.08.2022; approved and accepted for publication after reviewing 08.08.2022.