

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-54-63

О СПОСОБАХ МОДИФИКАЦИИ СТРУКТУРЫ ТРИКОТАЖНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ (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 способы модификации структуры трикотажных наполнителей для изготовления полимерных композиционных материалов (ПКМ). Описаны специфические особенности применения прессовых и плавающих петель, рассмотрены вопросы влияния дополнительно введенных нитей различного состава в структуру кулирного трикотажа на механические свойства наполнителя и ПКМ. Особое внимание уделено ластичному типу переплетения кулирного трикотажа, которое при невысокой плотности наполнителя способствует повышению прочности ПКМ.

Ключевые слова: кулирный, поперечновязанный, плосковязанный трикотажный наполнитель для полимерного композиционного материала, прессовые и воздушные петли, ластик, механические свойства

Для цитирования: 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-54-63.

Scientific article

ABOUT WAYS OF STRUCTURE MODIFICATION OF A KNITTED FILLERS FOR POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS (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. Methods of modifying the structure of knitted fillers for the manufacture of polymer composite materials (PCM) are considered. The specific features of the use of tuck and float loops are described, the issues of the influence of additionally introduced threads of various compositions in the structure of knitwear on the mechanical properties of filler and PCM are considered. Special attention is paid to the rib type of interlacing of knitted fabrics, which, with a low density of filler, contributes to increasing the strength of the PCM.

Keywords: weft-knitted, flat-knitted jersey, polymer composite materials, tuck and float loops, rib, mechanical properties

For citation: Ponomarenko L.A. About ways of structure modification of a knitted fillers for polymeric composite materials (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 3 (109), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-54-63.

Введение

При современном уровне развития технологий не всегда требуются кардинально новые материалы для наполнителей полимерных композиционных материалов (ПКМ), иногда необходимы новые навыки, подходы и знания о том, как изменить и улучшить уже существующие, чем и занимаются ученые во всем мире и в России в том числе. Так, уже довольно давно и успешно используют углеродные, стеклянные, арамидные ткани и волокна, а также ткани, изготавливаемые на основе волокон нескольких типов [1–5]. Однако каждый раз при изготовлении наполнителя методом плетения, ткачества [6] или вязания применяют более совершенные, улучшенные подходы, механизмы и способы подготовки исходных материалов.

Трикотажное полотно также вызывает большой интерес как наполнитель для получения ПКМ с высокими прочностными свойствами. Известно, что одним из главных преимуществ ПКМ на основе трикотажных наполнителей является их способность к поглощению и рассеиванию энергии ударных нагрузок, что позволяет таким материалам быть более устойчивыми к разрушению при ударных нагрузках. Наличие кулирного трикотажа в составе ПКМ способствует увеличению жесткости на изгиб и межслоевой вязкости, а также подавлению очагов расслоения [7]. В области применения трикотажного полотна в качестве наполнителя для ПКМ ведутся разработка и совершенствование структур трикотажного переплетения, а также создание новых подходов к переплетению волокон.

Большое количество исследований посвящено изучению наполнителей для ПКМ на основе обычной кулирной глади, переплетения ластичного типа 1+1 и других простых типов переплетения [8]. Однако все больше исследователей [9, 10] приходят к выводу о необходимости внесения серьезных изменений в структуру трикотажного полотна с целью придания свойств, позволяющих создать ПКМ, пригодный для высоких механических нагрузок.

Вязаные наполнители по своим свойствам – более пористые, эластичные и, как следствие, более легкие по сравнению с тканями наполнителями для ПКМ, что имеет неоспоримую ценность в авиастроении. Но особенность применения трикотажных наполнителей для ПКМ превращает указанные свойства в недостатки, которые являются основой трудностей применения кулирного трикотажа в качестве наполнителя для ПКМ:

- трудность получения трикотажного полотна с высокой объемной плотностью;
- сложность выработки трикотажного полотна из хрупких волокон, например углеродных [11];
- высокая растяжимость полотна, связанная с подвижностью нитей в петлях трикотажного переплетения. Однако при пропитке связующим подвижность нитей существенно снижается (до 100 раз) [12] и при увеличении плотности петель растяжимость полотна уменьшается, что согласуется с результатами моделирования структуры трикотажного полотна [9, 13];
- искривление вязаной структуры, которое не позволяет использовать трикотаж для изготовления точной формы.

К сожалению, перечисленные недостатки кулирного трикотажа значительно сужают область применения наполнителей на его основе, но не являются полностью непреодолимыми. Именно с этим связано множество попыток разработчиков и ученых во всем мире эффективно использовать основные достоинства кулирного трикотажа в качестве наполнителя для ПКМ:

- формирование изделий с малыми радиусами кривизны;
- возможность изготовления трикотажной заготовки по размерам изделия;

– высокая устойчивость к расслоению и ударным нагрузкам после отверждения в составе ПКМ [14, 15].

В настоящее время приведенный перечень достоинств трикотажных наполнителей активно обсуждается и исследуется. Все чаще поднимаются вопросы повышения механических свойств ПКМ на основе кулирного трикотажа для различного использования.

Цель данной работы – изучение существующих теоретических и практических способов модификации структуры и свойств кулирного плосковязаного трикотажа для расширения области применения в качестве наполнителя для ПКМ.

Способы улучшения свойств трикотажного наполнителя путем дополнения частично провязываемыми волокнами

Значительному увеличению прочности ПКМ на основе трикотажа способствует усиление трикотажного полотна дополнительными проложенными частично провязываемыми нитями, из которых формируются так называемые прессовые или плавающие петли. Как правило, при выработке полотна вдоль горизонтального ряда петель добавляются дополнительные нити, аналогичные основным нитям полотна или отличающиеся по составу от его основных нитей. В данном случае добавленное волокно частично провязывается с петлями основного волокна. Как правило, провязанные петли дополнительного волокна располагаются в ряду через каждые 3–5 провязанных петель основного волокна, формируя упрочняющие и уплотняющие протяжки (рис. 1).

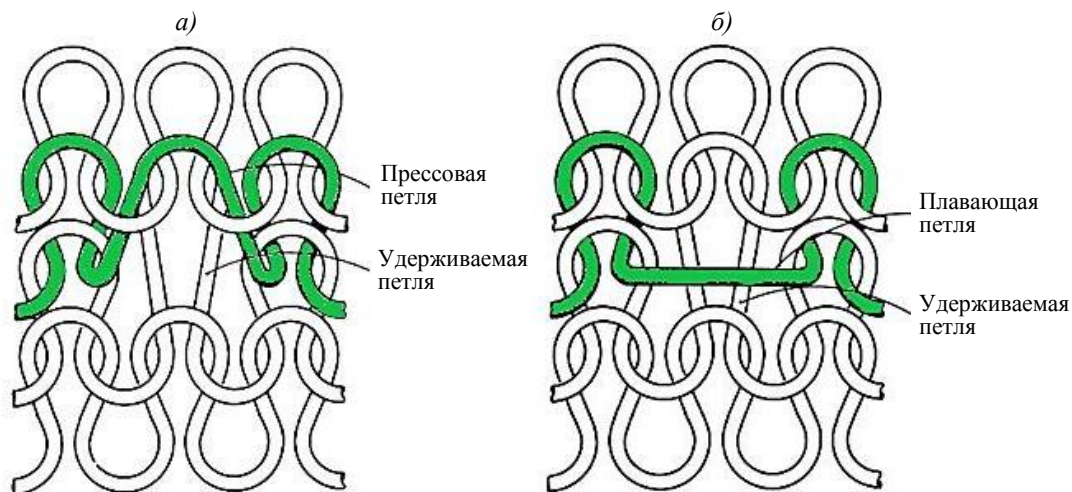


Рис. 1. Прессовая (а) и плавающая петли (б), формируемые при частичном провязывании дополнительных нитей [16]

Применяют и другую последовательность частичного провязывания дополнительных нитей. Такие добавленные петли также решают вопрос значительного снижения анизотропии и способствуют появлению свойств квазинепрерывно однонаправленно армированного ПКМ. Аналогичные свойства квазинепрерывно однонаправленно армированного и однонаправленно армированного ПКМ подробно рассмотрены в работах [12, 17].

В статье [8] приведены данные об увеличении модуля упругости при растяжении в 2,09 раза (с 8,2 до 17,2 ГПа) для стекловолоконного трикотажа, содержащего различное количество дополнительно проложенных нитей, и в 2,34 раза (с 9,3 до 21,8 ГПа) для углеволоконного трикотажа, содержащего различное количество дополнительно

проложенных нитей. Процесс вязания позволяет добавлять частично провязываемые волокна и перпендикулярно относительно направления выработки трикотажного полотна путем формирования прессовых петель. Такой процесс дает возможность уравновесить степень растяжимости трикотажного полотна вдоль петельных рядов.

В работе [10] указано на неравномерную зависимость свойств трикотажного наполнителя от количества дополнительных частично провязанных нитей. Так, для трикотажных тканей с одной дополнительной нитью показатели эластичности в продольном и поперечном направлениях превосходят результаты, полученные для трикотажных тканей с двумя и тремя дополнительными нитями.

Результаты моделирования, проведенные с помощью статистического программного обеспечения Design Expert с применением различных математических моделей [13], свидетельствуют о том, что изменение плотности плавающих петель или геометрической структуры полотна способствует улучшению или ухудшению его механических свойств в большей степени за счет изменения длины плавающих петель. В то же время наиболее подходящую длину плавающей петли определяют отдельно для каждой структуры трикотажного полотна.

Возможности повышения прочности и плотности трикотажного полотна за счет дополнительных непрвязываемых хрупких, но прочных волокон

Для решения проблемы, связанной с искривлением плоских трикотажных преформ, используют прямые стекловолокна для вставки в трикотажную стеклоткань вдоль направления горизонтальных петельных рядов и вертикальных петельных столбиков [18]. При этом описаны и различные комбинации типов вводимых волокон, в том числе аналогичные по составу трикотажу. Таким образом получают «вязано-тканую» ткань, состоящую из волокон различных типов, – комбинированную ткань (рис. 2) [19, 20].

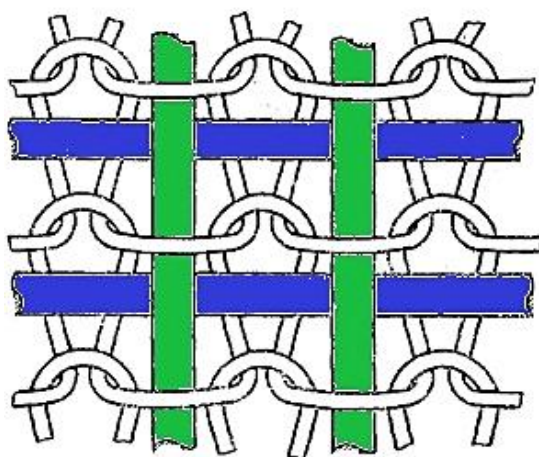


Рис. 2. Структура кулирного трикотажа с дополнительными непрвязанными нитями различного типа [21]

Такая ткань в составе препрега из ПКМ обладает хорошей драпируемостью и позволяет создавать изделия с изгибами сложной формы. Показано, что к полотну с добавленными волокнами требуется приложение больших усилий для достижения даже малых его деформаций, что способствует предотвращению искривления преформы. К сожалению, в настоящее время в промышленных масштабах такие виды трикотажных полотен не производят в связи с высокой стоимостью оборудования.

В группе комбинированных тканей, состоящих из волокон различных типов, выделяют также тканые и вязаные. Наиболее интересны комбинированные ткани на вязаной основе, поскольку позволяют создавать ПКМ, обладающие особыми механическими характеристиками (растяжение, прочность при изгибе и сопротивление ударной нагрузке) [22].

Вязаное полотно, дополненное хрупкими, но прочными волокнами, например углеволокнами, можно использовать в качестве наполнителя для ПКМ (как однонаправленный наполнитель, но с улучшенными механическими свойствами).

При выработке такого полотна в каждый поперечно провязываемый ряд петель вводят дополнительное волокно – хрупкое или волокно большого диаметра, которое не подлежит переработке на вязальной машине (например, углеродный ровинг). При этом вводимое волокно не изгибается в петлю и не подвергается другим воздействиям, приводящим к излому (рис. 3).

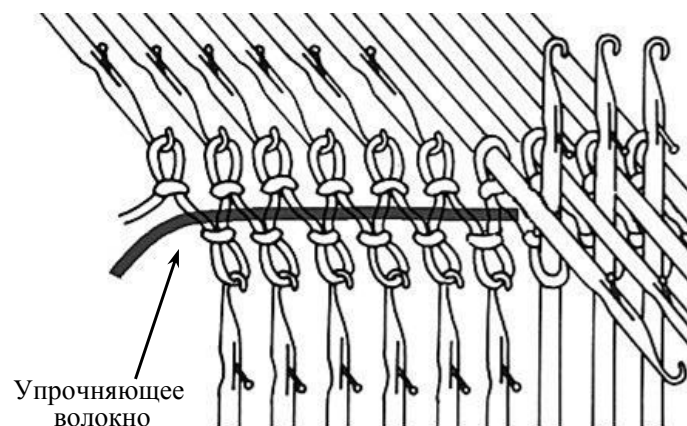


Рис. 3. Способ введения дополнительного упрочняющего волокна без провязывания петель вдоль горизонтальных петельных рядов

Полученный композиционный материал характеризуется анизотропией физических и механических свойств, а наибольшей прочности при растяжении достигает при приложении нагрузки вдоль дополнительно проложенных волокон [19]. Введением в трикотажное полотно, выработанное из тонкой углеродной нити, дополнительного углеродного ровинга в количестве 75–95 % удалось получить ПКМ прочностью 767–1157 МПа [19].

Трикотажные полотна с дополнительными волокнами можно выработывать как из одного, так и из различных видов волокон. Выбор гибридных наполнителей для ПКМ достаточно широкий – например, углеволокно и стекловолокно, углеволокно и арамидное волокно, стекловолокно и арамидное волокно, а также другие комбинации, в том числе состоящие и из трех типов волокон. После анализа кривых растяжения образцов из ПКМ на основе трикотажного полотна с дополнительными нитями авторы статьи [20] указывают на явное присутствие двух стадий разрушения, характеризующих действие наполнителя.

Первая стадия, начинающаяся от начала кривой и до разрушения дополнительных волокон наполнителя и связующего, характеризуется максимальной прочностью композиционного материала и описывается вогнутой формой кривой. Такая форма кривой появляется благодаря тому, что растягивающей нагрузке противостоят два компонента наполнителя – дополнительные волокна и трикотажное полотно.

Вторая стадия, начинающаяся от точки максимальной нагрузки и продолжающаяся до полного разрушения структуры трикотажного полотна, характеризуется резким снижением прочности композиционного материала и описывается ступенчато

снижающейся формой кривой. Ступенчатое снижение происходит вследствие того, что теперь растягивающей нагрузке противостоит только трикотажное полотно. Ступени кривой описывают различные моменты разрушения волокон в петлях трикотажного полотна. Проведенное моделирование методом конечных элементов [23] указывает на трехмерный уровень деформации трикотажного полотна вследствие сильной анизотропии свойств в направлении петельных рядов и столбиков, вызывающей смещение петель относительно друг друга и трение волокон, формирующих соседние петли. В результате разрушение трикотажного полотна происходит неравномерно и на кривой растяжения появляются ступени.

Следует указать и на характер разрушения ПКМ на основе кулирного трикотажа при ударных воздействиях. Наибольшая опасность разрушения в таком случае связана с разрушением игольных дуг петель и платиновых дуг между петлями наполнителя (это наиболее напряженное место). А вот длинные участки петли, так называемые петельные палочки, напротив, способствуют повышению прочности при растяжении [24].

В то же время в работе [25] приведены результаты моделирования механических свойств композиционного материала на основе углеродного трикотажа методом конечных элементов, указывающие на то, что ступенчатый характер разрушения ПКМ реализуется при растяжении только в направлении петельных столбиков. При растяжении ПКМ в направлении петельных рядов кривая растяжения имеет гладкую форму. Таким образом, при разработке структуры трикотажного полотна с дополнительными непровязанными волокнами необходимо учитывать анизотропию характера разрушения вязаного наполнителя при приложении нагрузки.

Введение дополнительных волокон может представлять интерес также для получения других, немеханических, характеристик ПКМ, например электро- и теплопроводности при введении металлической проволоки [26]; введение оптоволокна в трикотажное полотно позволит проводить мониторинг нагруженности ПКМ.

Еще один способ повышения плотности вязаных наполнителей – это сложение ткани в несколько слоев и закрепление строчкой. Однако для улучшения свойств более эффективной является структура, в которой сложенные слои вязаной ткани будут внутренними слоями, а сверху и снизу будут проложены тканые наполнители и прошиты строчкой насквозь. Такая структура уже в полной мере будет иметь все характеристики 3D-наполнителя [18].

Возможности повышения прочности ПКМ за счет снижения плотности трикотажного наполнителя

Представленные ранее способы модификации трикотажного наполнителя позволяют повысить его плотность, а ПКМ на его основе – прочность и равномерность распределения связующего при отверждении. В то же время известен способ повышения прочности ПКМ за счет снижения плотности трикотажного наполнителя [12, 27–29]. Такой способ реализует ситуацию, наиболее приближенную к квазинепрерывному армированию ПКМ.

Снижения плотности трикотажного наполнителя достигают благодаря увеличению модуля петли, но только до некоторой критической длины [28]:

$$\sigma = \frac{31,62l}{\sqrt{T}},$$

где σ – модуль петли; l – длина нити в петле, мм; T – линейная плотность нити, текс. Критическая длина нити петли зависит от свойств волокна и определяется отдельно в каждом частном случае.

Следует отметить, что к повышению прочности ПКМ приводят не все виды кулирного трикотажа пониженной плотности. Таким образом, для выбора типа переплетения кулирного трикотажа следует учитывать, что он должен обладать единообразной монотипной структурой (без рисунчатых фрагментов), а также не должен скручиваться и изгибаться (лучшими типами переплетения в данном случае будут двухлицевые).

Переплетения ластичного типа (ластик) удовлетворяют перечисленным условиям и вполне могут применяться для изготовления трикотажного наполнителя для ПКМ. Трикотаж на основе ластичного типа переплетения также обладает повышенной толщиной – вдвое больше толщины кулирной глади, выработанной из волокна с одинаковой толщиной и плотностью [21]. При сравнении двух плосковязанных ластичных структур становятся очевидны различия. Так, ластик 1+1 и ластик 2+2, выработанные из стекловолокна (133 текс), имеют небольшие отличия в процессе выработки, но характеризуются значимыми различиями в поверхностной плотности [30]: 1907,73 г/м² – для ластика 2+2 и 1426,27 г/м² – для ластика 1+1.

Таким образом, показано, что при выборе типа ластика со сниженной плотностью в качестве наполнителя для ПКМ необходимо тщательно оценивать критическую длину петли совместно со свойствами применяемого волокна.

Заключения

Рассмотренные способы модификации структуры кулирного трикотажа на данном этапе развития имеют свои особенности, достоинства и недостатки. Так, изменение структуры трикотажного наполнителя путем введения дополнительных частично провязываемых и непровязываемых волокон требует тщательного подбора вида и состава волокон, расчета критического количества вводимых волокон и определения других параметров.

Тем не менее модификация структуры кулирного трикотажа с помощью частично провязываемых и непровязываемых волокон открывает возможности применения данных наполнителей для упрочнения деталей авиационных конструкций, например в качестве внутренних слоев между слоями тканого наполнителя. Такое использование трикотажного наполнителя в составе ПКМ значительно повышает ударную прочность конструкции.

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. Курносов 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. Li C., Zhang R., Jia J. et al. The low-velocity impact and post-impact properties of ultra-high-molecular-weight polyethylene fiber weft plain knitted structural composites // *Journal of engineered fibers and fabrics*. 2019. Vol. 14. P. 1–10. DOI: 10.1177/1558925019832254.
8. 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.
9. Faridul Hasan K.M., Péter György Horváth, Tibor Alpár. Potential fabric-reinforced composites: a comprehensive review // *Journal of Materials Science. Review*. Springer, 2021. P. 1–7. DOI: 10.1007/s10853-021-06177-6.
10. 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.
11. Богомолов И.П., Козлов И.А., Бируля М.А. Обзор современных технологий изготовления объемно-армирующих преформ для перспективных композиционных материалов // *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2017. № 1 (39). С. 22–27.
12. Труевцев А.В., Цобкалло Е.С., Москалюк О.А. Квазинепрерывное армирование композита кулирным трикотажем // *Технология легкой промышленности*. 2016. № 1. С. 64–67.
13. 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.
14. Nermin M. Aly. A review on utilization of textile composites in transportation towards sustainability // *17th World textile conference AUTEX 2017*. 2017. No. 254. P. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/254/4/042002.
15. Hu H., Zhang M., Fanguiero R., De Araujo M. Mechanical properties of composite materials made of 3D stitched woven-knitted preforms // *Journal of composite materials*. 2010. Vol. 44. No. 14. P. 1753–1767. DOI: 10.1177/0021998309359211.
16. Bhosale N., Jadhav B. Weft Knitted Fabrics // *Texnote.blogspot.com*. 2017. URL: <http://texnote.blogspot.com/2017/01/weft-knitted-fabrics.html> (дата обращения: 05.10.2021).
17. Молоснов К.А. Разработка трикотажных полотен для армирования композиционных материалов: автореф. ... дис. канд. техн. наук. СПб., 2013. 17 с.
18. 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.
19. Bezsmertna V., Mazna O., Kohanyiy V. et al. Multifunctional polymer-based composite materials with weft-knitted carbon fibrous fillers // *MATEC Web of Conferences EASN 2019*. 2019. No. 304. Art. 01012. DOI: 10.1051/mateconf/201930401012.
20. 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.
21. Далидович А.С. Основы теории вязания. М.: Легкая индустрия, 1970. 432 с.
22. Aisyah H.A., Paridah M.T., Sapuan S.M. et al. A comprehensive review on advanced sustainable woven natural fiber polymer composites // *Polymers*. 2021. Vol. 13. No. 471. P. 15–45. DOI: 10.3390/polym13030471.
23. Liu D., Christe D., Shakibajahromi B. et al. On the role of material architecture in the mechanical behavior of knitted textiles // *International Journal of Solids and Structures*. 2017. No. 109. P. 101–111. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2017.01.011.
24. Tohidi Sh.D., Rocha A.M., Dencheva N.V., Denchev Z. Microstructural-mechanical properties relationship in single polymer laminate composites based on polyamide 6 // *Composites. Part B*. 2018. No. 153. P. 315–324. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.08.106.
25. Ravandi M., Ahlquist S., Banu M. Numerical modeling of mechanical behavior of weft-knitted carbon fiber composites // *8th European conference for aeronautics and space science (EUCASS)*. 2019. P. 1–8. DOI: 10.13009/EUCASS2019-811.
26. Haijun D., Jialu L., Ying S. et al. Electrothermal and interlaminar shear properties of weft knitted biaxial fabric/epoxy resin electrically heated composites // *Acta Materiae Compositae Sinica*. 2020. Vol. 37. No. 8. P. 1997–2004. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20191129.001.

27. Труевцев А.В., Цобкалло Е.С., Москалюк О.А. Полимерные композиционные материалы с трикотажным наполнителем // Современные тенденции развития химии и технологии полимерных материалов: тез. докладов IV Междунар. науч. конф. СПб., 2018. С. 57–59.
28. 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.
29. Truevtsev A.V., Tsobkallo E.S., Moskalyuk O.A. Structure and properties of composites with sunken-loop knit fabric filler // *Fibre Chemistry*. 2018. Vol. 50. No. 4. P. 325–331. DOI: 10.1007/s10692-019-09984-5.
30. Gunes K.S., Ince M.E., Icoğlu H.I. Compressibility of weft knitted reinforcement fabrics from glass yarn // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. No. 460. P. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/460/1/012029.

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. 5, 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. Li C., Zhang R., Jia J. et al. The low-velocity impact and post-impact properties of ultra-high-molecular-weight polyethylene fiber weft plain knitted structural composites. *Journal of engineered fibers and fabrics*, 2019, vol. 14, pp. 1–10. DOI: 10.1177/1558925019832254.
8. 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.
9. Faridul Hasan K.M., Péter György Horváth, Tibor Alpár. Potential fabric-reinforced composites: a comprehensive review. *Journal of Materials Science. Review*, 2021, vol. 56 (1), pp. 1–7. DOI: 10.1007/s10853-021-06177-6.
10. 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.
11. Bogomolov I.P., Kozlov I.A., Birulya M.A. Review of modern technologies for the manufacture of volume-reinforcing preforms for promising composite materials. *Tekhniko-tehnologicheskie problemy servisa*, 2017, no. 1 (39), pp. 22–27.
12. 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.
13. 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.
14. Nermin M. Aly. A review on utilization of textile composites in transportation towards sustainability. *17th World textile conference Autex 2017*, 2017, no. 254, pp. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/254/4/042002.

15. Hu H., Zhang M., Fangueiro R., De Araujo M. Mechanical properties of composite materials made of 3D stitched woven-knitted preforms. *Journal of composite materials*, 2010, vol. 44, no. 14, pp. 1753–1767. DOI: 10.1177/0021998309359211.
16. Bhosale N., Jadhav B. *Weft Knitted Fabrics*. 2017. Available at: <http://texnote.blogspot.com/2017/01/weft-knitted-fabrics.html> (accessed: October 05, 2021).
17. Molossov K.A. *Development of knitted webs for reinforcement of composite materials*: thesis abstract, Cand. Sc. (Techn.). St. Petersburg, 2013, 17 p.
18. 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.
19. Bezmertna V., Mazna O., Kohanyiy V. et al. Multifunctional polymer-based composite materials with weft-knitted carbon fibrous fillers. *MATEC Web of Conferences EASN 2019*, 2019, no. 304, art. 01012. DOI: 10.1051/mateconf/201930401012.
20. 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.
21. Dalidovich A.S. *Fundamentals of the theory of knitting*. Moscow: Legkaya industriya, 1970. 432 p.
22. Aisyah H.A., Paridah M.T., Sapuan S.M. et al. A comprehensive review on advanced sustainable woven natural fiber polymer composites. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 471, pp. 15–45. DOI: 10.3390/polym13030471.
23. Liu D., Christe D., Shakibajahromi B. et al. On the role of material architecture in the mechanical behavior of knitted textiles. *International Journal of Solids and Structures*, 2017, no. 109, pp. 101–111. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2017.01.011.
24. Tohidi Sh.D., Rocha A.M., Dencheva N.V., Denchev Z. Microstructural-mechanical properties relationship in single polymer laminate composites based on polyamide 6. *Composites. Part B*, 2018, no. 153, pp. 315–324. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.08.106.
25. Ravandi M., Ahlquist S., Banu M. Numerical modeling of mechanical behavior of weft-knitted carbon fiber composites. *8th European conference for aeronautics and space science (EUCASS)*, 2019, pp. 1–8. DOI: 10.13009/EUCASS2019-811.
26. Haijun D., Jialu L., Ying S. et al. Electrothermal and interlaminar shear properties of weft knitted biaxial fabric/epoxy resin electrically heated composites. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, vol. 37, no. 8, pp. 1997–2004. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20191129.001.
27. 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 polymer materials*: reports IV Intern. scientific conf. St. Petersburg, 2018, pp. 57–59.
28. Bazanova E.A., Truevtsev A.V. On the possibility of using knitwear as a filler for composites. *Young scientists – the development of the national technological initiative (POISK)*, 2020, no. 1, pp. 21–23.
29. Truevtsev A.V., Tsobkallo E.S., Moskalyuk O.A. Structure and properties of composites with sunken-loop knit fabric filler. *Fibre Chemistry*, 2018, vol. 50, no. 4, pp. 325–331. DOI: 10.1007/s10692-019-09984-5.
30. Gunes K.S., Ince M.E., Icoğlu H.I. Compressibility of weft knitted reinforcement fabrics from glass yarn. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, no. 460, pp. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/460/1/012029.

Информация об авторах

Пономаренко Леся Алексеевна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Lesya A. Ponomarenko, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 29.10.2021; одобрена и принята к публикации после рецензирования 08.12.2021.

The article was submitted 29.10.2021; approved and accepted for publication after reviewing 08.12.2021.