

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-113-122

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ОБЪЕМНО-АРМИРОВАННОЙ СТРУКТУРОЙ (обзор)

А.В. Славин¹, А.Н. Силкин², Д.В. Гриневич¹, Н.О. Яковлев¹

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

²Акционерное общество «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия; info@technologiya.ru

Аннотация. Рассмотрены композиционные материалы с объемно-армированной структурой. Проведен обзор основных вариантов материалов по способу изготовления: тканые, вязаные, плетеные и со сквозным армированием, а также тканые с многоосным полотном и тканые с просветом. Объемное армирование позволяет повысить прочность на сдвиг, сопротивление расслоению и удару. Однако оно же снижает другие механические свойства за счет повреждения или искажения горизонтальных волокон. Наиболее перспективными для использования в несущих конструкциях являются тканые объемно-армированные композиционные материалы за счет наименьшего разрушения волокон.

Ключевые слова: композиционные материалы, тканые, вязаные, плетеные, сквозное армирование, объемно-армированные материалы, механические характеристики

Для цитирования: Славин А.В., Силкин А.Н., Гриневич Д.В., Яковлев Н.О. Композиционные материалы с объемно-армированной структурой (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 8 (114). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-113-122.

Scientific article

COMPOSITE MATERIALS WITH A 3D-REINFORCED STRUCTURE (review)

A.V. Slavin¹, A.N. Silkin², D.V. Grinevich¹, N.O. Yakovlev¹

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

²JSC ORPE «Technologiya» named after A.G. Romashin, Obninsk, Russia; info@technologiya.ru

Abstract. Considers composite materials with a 3D-reinforced structure. A review of the main options for materials according to the manufacturing method was carried out: woven, knitted, braided and with through reinforcement, as well as woven with a multiaxial fabric and woven with a distance. 3D-reinforcement allows you to increase the shear strength, resistance to delamination and impact. However, it also reduces other mechanical properties by damaging or distorting the horizontal fibers. The most promising for use in load-bearing structures are 3D-woven composite materials due to the least destruction of fibers.

Keywords: composite materials, woven, knitted, braided, through reinforcement, bulk reinforced materials, mechanical characteristics

For citation: Slavin A.V., Silkin A.N., Grinevich D.V., Yakovlev N.O. Composite materials with a 3D-reinforced structure (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 8 (114), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-113-122.

Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ), армированные волокном, обладают хорошими показателями удельной прочности и жесткости, а также коррозионной стойкости и сопротивлением усталости [1–4]. Разработанные технологии переработки ПКМ (автоклавное и печное формование, инфузия и др.), различные варианты используемых связующих (эпоксидные, термопластичные полимерные матрицы и др.) обеспечивают внедрение данных материалов в различные отрасли народного хозяйства и промышленности, включая авиа-, автомобиле- и судостроение, а также энергетику, машиностроение, транспорт и многие другие. В то же время недостатком однонаправленных композиционных материалов являются низкие значения механических характеристик в направлениях, отличающихся от продольного [5, 6]. Устранить этот недостаток возможно использованием в конструкциях разнонаправленной слоистой укладки (большее количество направлений укладки волокон позволяет приближаться структуре материала к изотропной) или созданием тканых материалов [7]. При этом такие композиционные материалы чувствительны к межслойному разрушению, ударным нагрузкам и имеют низкое сопротивление сдвиговым деформациям.

Наиболее чувствительными характеристиками традиционных слоистых ПКМ являются те, которые характеризуют работоспособность полимерной матрицы в композите – это, прежде всего, характеристики при сдвиге, сжатии, ударе (включая сжатие после удара), трещиностойкости и некоторые другие. Эти характеристики во многом являются критическими (определяющими) для работоспособности изделий и сложных технических систем, изготовленных из ПКМ, поскольку в условиях сложнонапряженного состояния, определяемого условиями эксплуатации (внешнего воздействия), зачастую невозможно конструктивными решениями исключить такое нагружение, при котором нагрузку воспринимает (а не перераспределяет между волокнами армирующего наполнителя) именно полимерная матрица.

Существуют различные методы повышения межслойной прочности материалов – например, упрочнение матрицы, гибридизация и др. Однако одним из наиболее перспективных способов повышения этих характеристик является использование в качестве армирующего наполнителя объемно-армированных преформ, которые имеют дополнительно вертикальные связи между слоями.

Среди ограничений при использовании объемно-армированных композиционных материалов можно выделить их высокую стоимость и сложность в изготовлении, что можно компенсировать меньшими затратами на сборку деталей.

В зарубежной авиационной технике можно выделить следующие примеры практического применения объемно-армированных композиционных материалов: панели воздухопроводов; узлы крыльев; лопасти вентиляторов; места соединений в капсуле космического корабля, выполненной из композита; задний гермошпангоут в самолете Airbus A380 (метод многонаправленной вязки, размер детали 5,5×6,2 м); головные обтекатели и пр. Область применения трехмерно-армированных композиционных материалов постоянно расширяется [8, 9].

Объемно-армированные композиционные материалы по методу изготовления в основном можно разделить на тканые, плетеные, вязаные, прошитые и со сквозным армированием.

Тканые объемно-армированные композиционные материалы

Ткачество широко применяется в производстве однослойных тканей. Данная технология модифицирована для получения трехмерных тканых материалов, которые содержат сквозные волокна (жгуты), связывающие между собой слои. В плоскости слоя происходит переплетение двух наборов нитей: основы и утка. Последовательность

переплетения нитей основы и утка, а следовательно, и рисунок, который создается на ткани, влияет на ее свойства, механические характеристики, долговечность и объемную долю волокон. При изготовлении трехмерно-армированных тканых композиционных материалов применяют различное количество волокон в трех взаимно перпендикулярных направлениях – в плоскости листа (x , y) и по толщине (z). Это позволяет «адаптировать» свойства материала для применения в конкретной детали или конструкции.

Примеры вариантов структуры объемно-армированной многослойной ткани приведены на рис. 1.

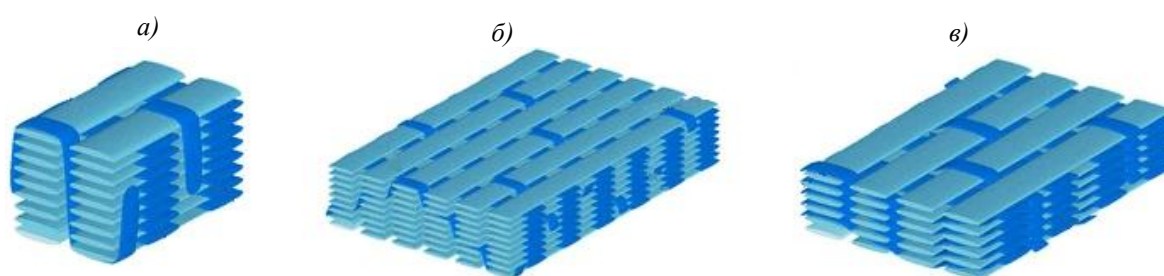


Рис. 1. Примеры объемно-армированной тканой структуры с разными видами прошивки: *а* – ортогональной; *б* – сквозной под углом; *в* – послойной [7]

При ортогональном шитье волокна направления z протягиваются через нити основы и утка, пересекая слои под углом 90 градусов. Если нити чередуются равномерно в каждом из трех направлений, то обеспечиваются квазиизотропные свойства. В случае когда требуется анизотропия – можно варьировать число нитей по направлениям. Ортогональное шитье может выполняться по всей толщине многослойной преформы, в которой связующая нить удерживает все слои вместе, или же обеспечивать послойную связь – связующая нить перемещается из слоя в соседний слой и возвращается обратно, набор переплетенных основ удерживает все слои преформы вместе. Шитье под углом подразумевает, что связующие нити проходят через всю толщину (или несколько слоев) под некоторым углом. Связующая нить может иметь одно и то же количество волокон (как и нити основы и утка) или быть более тонкой, если этого достаточно для связи слоев. В одинаковых условиях объемно-армированные тканые структуры со схемой переплетения под углом обладают лучшей драпируемостью и способностью к искривлению, тогда как ортогональное шитье обеспечивает бóльшую объемную долю волокна (особенно в направлении толщины) и бóльшую прочность.

Объемно-армированные тканые композиционные материалы могут создаваться не только в виде плоских деталей. В случае запрограммированной последовательности подъема нитей основы можно соткать ткань с разрезами. Далее при раскрытии данных вырезов можно получить сложную трехмерную конструкцию – пример цельнотканой балки двутаврового сечения демонстрируется в работе [10].

Приведенные на рис. 1 схемы демонстрируют идеализированные структуры, зачастую на практике конечный результат может сильно отличаться от них [11]. Это вызвано разным натяжением нитей и трением между ними, а также влиянием начальных условий состояния волокон (их размер, закрутка, расстояние между волокнами, количество слоев ткани и т. д.). Все это может повлиять на конечную структуру материала и, следовательно, на его свойства. Большинство ткацких установок для производства многослойных тканей (как и традиционных) способны производить ткани только с волокнами, расположенными в плоскости полотна под углами 0 и 90 градусов (хотя связующие межслойные волокна при этом могут быть ориентированы под произвольным углом). Это ограничивает использование данных материалов, поскольку их свойства

при сдвиге и кручении могут быть относительно низкими. Для решения данной проблемы разработаны *многоосные* тканые материалы [12–14]. Для их производства требуется узкоспециализированное оборудование, которое позволяет изготавливать преформы с нитями в плоскости полотна не под углом 90 градусов. На рис. 2 приведен пример многоосного тканого материала – трехосного и четырехосного. Однако объемная доля волокон для многоосной ткани может быть меньше, чем у традиционной. Данная технология активно развивается.

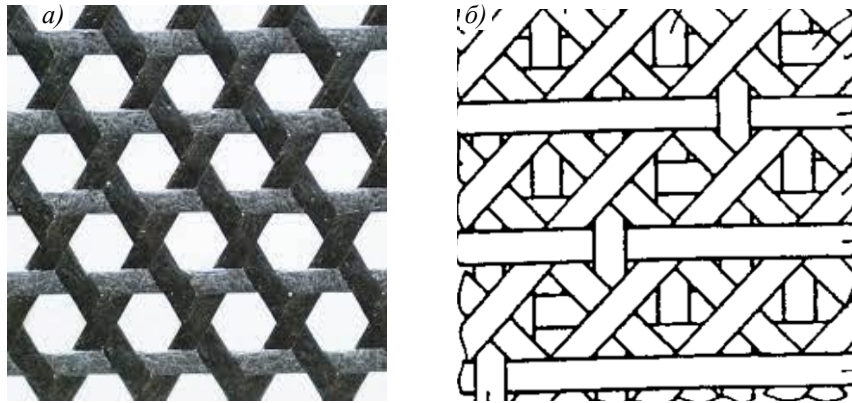


Рис. 2. Трехосное тканое полотно (а) и схема четырехосного переплетения (б) [9]

Другим специфическим вариантом объемно-армированного тканого материала будет тканый материал с просветом (*distance Fabrics*) [7]. В этом многослойном тканом материале два набора нитей основы разнесены на расстояние. Получается два полотна, которые связаны нитями, переходящими из слоя в слой и обеспечивающими прочную связь между двумя лицевыми поверхностями (рис. 3). Данный материал подходит для производства устойчивых к отслаиванию и расслаиванию многослойных конструкций (сэндвич-панелей).

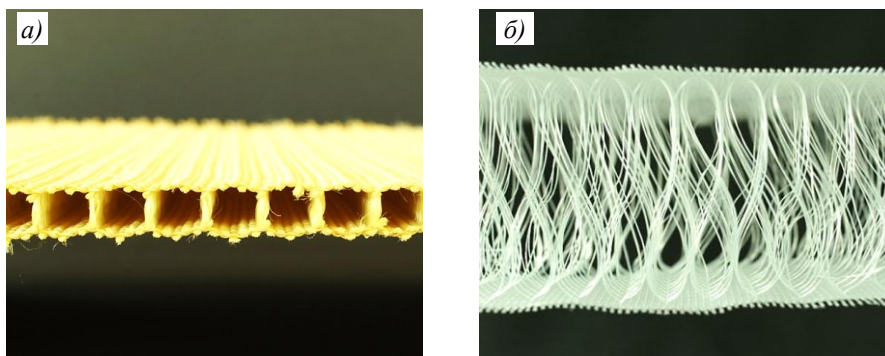


Рис. 3. Тканый материал с просветом из арамидного волокна (а) и стекловолотно (б) [15]

Плетеные объемно-армированные композиционные материалы

Плетеные из угле- или стекловолокон материалы широко применяются в машиностроении. Процесс объемного плетения значительно отличается от двумерного, требуются более сложные установки. Объемно-армированный плетеный материал обладает рядом важных преимуществ по сравнению со многими типами двумерных композиционных материалов. Это высокий уровень конформности, драпируемости, прочности при кручении и конструкционной целостности. Кроме того, процессы объемного

плетения позволяют формировать заготовки сложной формы с переменным поперечным сечением – например, конической формы, а также с отверстиями, изгибами и разветвлениями [16]. На рис. 4 приведены примеры объемно-армированной плетеной структуры – отдельный элементарный объем (рис. 4, а) и пример сложной формы (рис. 4, б).

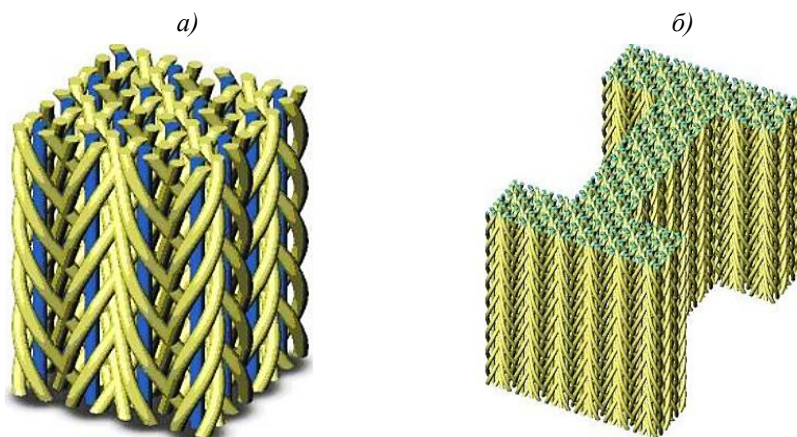


Рис. 4. Примеры объемно-армированной плетеной структуры:
а – элементарный объем; б – плетеноя заготовка в форме двутавра [17]

Вязаные объемно-армированные композиционные материалы

Технология вязки композиционных материалов имеет наименьшее распространение в машиностроении из приведенных методов из-за своей специфики: петли значительно искажают форму волокон, снижая общую несущую способность материала. Но объемно-армированный вязаный материал обладает рядом важных преимуществ, в частности очень высокой драпируемостью (что связано со способностью вязаных слоев сдвигаться на некоторую величину относительно друг друга за счет формы петель) и высокой гибкостью, что отлично подходит для изготовления несущих деталей сложной формы. Слои вязаного полотна можно растягивать так, чтобы они покрывали необходимую поверхность полностью, при этом нет необходимости разрезать и перекрывать участки при существенном искажении формы. Это позволяет уменьшить расход материала и снизить затраты на изготовление деталей сложной формы [9, 18]. Вязаная структура данных материалов также способствует их превосходной стойкости к ударным повреждениям [19]. На рис. 5 приведен пример изготовления элемента из объемно-армированного вязаного композиционного материала.

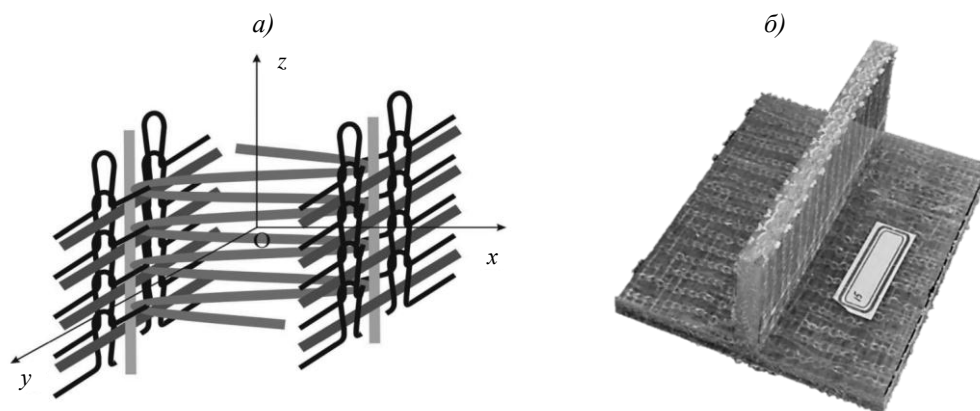


Рис. 5. Пример объемно-армированного вязаного композиционного материала:
а – схема вязки; б – изготовленный Т-образный образец [18]

Прошитые объемно-армированные композиционные материалы

Прошивка слоев по всей толщине высокопрочной нитью является простым и недорогим методом получения объемно-армированных композиционных материалов. Прошивка в основном выполняется угле-, стекловолокном или кевларовой нитью через все слои исходного материала с помощью специальной швейной машины промышленного класса (рис. 6, *a*). На рис. 6, *б* изображена поверхность прошитого материала. Меняя схему прошивки (расстояние, наклон и др.) и рисунок стежков (на поверхности), можно получить различную объемную долю армирования и различное распределение свойств.

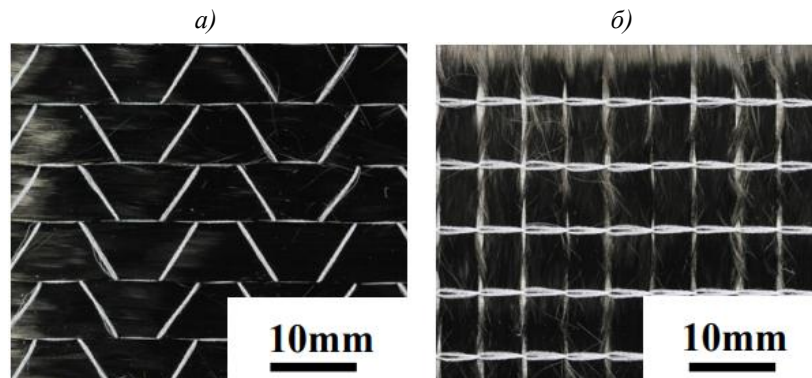


Рис. 6. Пример прошитого объемно-армированного композиционного материала: *a* – лицевая сторона; *б* – тыльная сторона [19]

Арамидные волокна наиболее часто применяются для сшивания композиционных материалов, поскольку их относительно просто можно использовать в швейных машинах и они более устойчивы к грубому обращению при прошивке в сравнении со стекло- и углеволокном. Однако в процессе эксплуатации их применение может вызывать трудности из-за их влагонасыщения, а также плохой адгезии со многими стандартными полимерными смолами, что вынуждает аккуратней применять конструкции из них, принимая во внимание, что при определенных внешних условиях механические характеристики материала конструкции могут быть снижены. У стекло- и углеволокна нет подобных проблем с влагопоглощением и адгезией, но их значительно сложнее использовать в швейных машинах. Это связано с присущей им хрупкостью, которая может привести к обрыву волокон при формировании стежковых узлов и истиранию волокон при их прохождении через швейную машину.

Один из самых амбициозных проектов по созданию объемно-армированных композиционных материалов выполнен NASA совместно с компанией Boeing. В рамках этого проекта разработана прошивающая машина длиной 28 м для производства из композитов компонентов крыла самолета с повышенной стойкостью к ударам [20]. Однако создание подобных прошивающих машин слишком затратно для большинства производителей композиционных материалов, поэтому в последнее время исследователи сосредоточились на разработке роботизированных подвижных швейных головок с компьютерным управлением, которые способны работать на сложной криволинейной поверхности. Доля армирования по толщине в прошитых композиционных материалах обычно составляет от 1 до 5 %, что соответствует аналогичной доле армирования в объемно-армированных тканых, плетеных или вязаных композиционных материалах. Прошивка также может быть использована для создания сложных трехмерных конструкций путем сшивания нескольких отдельных компонентов вместе. Исчезает

необходимость в механических крепежных элементах, таких как заклепки, винты и болты, снижается масса изделия и зачастую стоимость изготовления конструкции. При необходимости швы можно наносить локально, только в тех местах, которые надо усилить – например, вдоль края детали, вокруг отверстий, вырезов или в стыках.

Объемно-армированные композиционные материалы со сквозным армированием (композиционные материалы с арматурой)

Армирование в этом случае производится тонкими стержнями арматуры из металла или из волокон [21, 22] на неотвержденных препрегах (рис. 7). При этом локальное усиление соединений устраняет необходимость в крепежных элементах или заклепках и обеспечивает более равномерное распределение нагрузки по площади соединения.

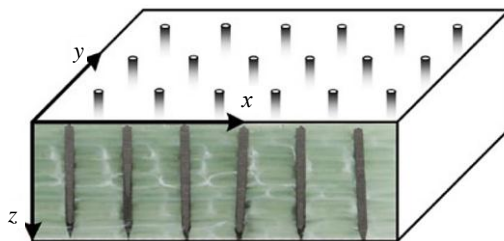


Рис. 7. Схема композиционного материала с арматурой [21]

Данное армирование применяется иногда не только для увеличения ударостойкости композиционных материалов, но и для повышения сдвиговых характеристик за счет жесткой арматуры – например, в сэндвич-панелях с пеноматериалами [23].

Однако в работах [24, 25] на материалах марок Т300/ВМІ и Т650/ВМІ показано, что значения прочности и усталостной долговечности материала уменьшались с увеличением объемной доли и размера стержней арматуры. При установке стержней арматуры волокна материала могут расщепляться и повреждаться, в худшем случае волокна разрываются полностью, а концентрация таких дефектов существенно снижает прочность всего слоя, что можно частично исправить за счет уменьшения диаметра применяемой арматуры.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексного научного направления 2. «Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов, неразрушающий контроль» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Заключения

Приведен обзор основных композиционных материалов с объемно-армированной структурой: тканых, плетеных, вязаных, прошитых и со сквозным армированием. Главное преимущество данных материалов – решение с их помощью основных проблем композиционных материалов, а именно: чувствительности к межслойному разрушению, ударным нагрузкам и низкого сопротивления сдвиговым деформациям. В обзоре также показаны проблемы материалов с объемно-армированной структурой – уменьшение других механических характеристик (особенно для материалов с существенным искажением волокон – вязаных и плетеных). К таким характеристикам можно отнести, например, прочность и модуль упругости при растяжении и сжатии. Тканые и прошитые объемно-армированные композиционные материалы являются перспективными для использования в силовых конструкциях. Однако следует уделить особое внимание изучению их свойств.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
2. 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.
3. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
4. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
5. Сорокин А.Е., Иванов М.С., Сагомонова В.А. Термопластичные полимерные композиционные материалы на основе полиэфирэфиркетонов различных производителей // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1 (66). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 07.07.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-41-50.
6. Гриневиц Д.В., Яковлев Н.О., Славин А.В. Критерии разрушения полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 7 (79). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.07.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-92-111.
7. Saleh M.N., Soutis C. Recent advancements in mechanical characterisation of 3D woven composites // Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes. 2017. No. 3. P. 1–17. DOI: 10.1186/s40759-017-0027-z.
8. 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.
9. Tong L., Mouritz A.P., Bannister M.K. 3D Fibre Reinforced Polymer Composites. Elsevier Science, 2002. 254 p.
10. Muller J., Zulliger A., Dorn M. Economic production of composite beams with 3D fabric tapes // Textile Month. 1994. Sept. P. 9–13.
11. Mouritz A.P., Bannister M.K., Falzon P.J., Leong K.H. Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. 1999. Vol. 30. Is. 12. P. 1445–1461. DOI: 10.1016/S1359-835X(99)00034-2.
12. Labanieh A.R., Legrand X., Koncar V., Soulat D. Development in the multiaxis 3D weaving technology // Textile Research Journal. 2015. No. 86. P. 1–16. DOI: 10.1177/0040517515612365.
13. Curiskis J.I., Durie A., Nicolaidis A., Herszberg I. Developments in multiaxial weaving for advanced composite materials // Proceedings of ICCM–11 (Gold Coast, Australia, July 14–18, 1997). 1997. Vol. 5. P. 86–96.
14. Labanieh A.R., Legrand X., Koncar V., Soulat D. Novel optimization method to estimate the geometrical properties of a multiaxial 3D woven preform // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2013. No. 32. P. 3–16. DOI: 10.1177/0731684412472746.
15. 3D Weaving. URL: <https://www.3dweaving.com/en/products/distance-fabrics/constant-height> (дата обращения: 05.07.2022).
16. Li X., He X., Liang J. et al. Research Status of 3D Braiding Technology // Applied Composite Materials. 2022. No. 29. P. 147–157. DOI: 10.1007/s10443-021-09963-2.
17. Khayale J. Development of 3D Braiding Concept for Multi-Axial Textile Preforms: PhD Thesis. Textile Composite Group School of Materials. 2015. 188 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/354561676_Research_Status_of_3D_Braiding_Technology (дата обращения: 05.07.2022).
18. Zhang M., Sun B., Hu H., Gu B. Dynamic Behavior of 3D Biaxial Spacer Weft-Knitted Composite T-Beam Under Transverse Impact // Mechanics of Advanced Materials and Structures. 2009. No. 16 (5). P. 356–370. DOI: 10.1080/15376490802710761.

19. Tanaka K., Ushiyama R., Katayama T. et al. Formability evaluation of carbon fiber NCF by a non-contact 3D strain measurement system and the effects of blank folder force on its formability // *High Performance and Optimum Design of Structures and Materials*. 2014. Vol. 137. P. 317–326.
20. Beckworth S.W., Hyland C.R. Resin transfer moulding: a decade of technology advances // *Society for the Advancement of Material and Process Engineering Journal*. 1998. No. 34. P. 7–19.
21. Schornstein B., Staschko R., Fuchs N., Glück N. Manufacturing Principles for Z-Pin Reinforced FRP Composite Laminates in the Case of Bolted Joints // *Lightweight Design Worldwide*. 2017. No. 10 (3). P. 28–33. DOI: 10.1007/s41777-017-0025-1.
22. Klopp K., Moll K.-U., Wulfhorst B. Stitching process with one-sided approach of the textile for the production of reinforcing textiles for composites and other technical textiles // *The 5th International Conference on Textile Composites (Leuven, Belgium, September 18–20, 2000)*. 2000. P. 67–70.
23. Mouritz A.P. Review of z-pinned composite laminates // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2007. No. 38. P. 2383–2397.
24. Chang P., Mouritz A.P., Cox B.N. Properties and failure mechanisms of z-pinned laminates in monotonic and cyclic tension // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2006. No. 37 (10). P. 1501–1513. DOI: 10.1016/j.compositesa.2005.11.013.
25. Chang P., Mouritz A.P., Cox B.N. Flexural properties of z-pinned laminates // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2007. No. 38 (2). P. 244–251. DOI: 10.1016/j.compositesa.2006.05.004.

References

1. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Reports of XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, pp. 24.
2. Kablov E.N., Sagomonova V.A., Sorokin A.E., Tselikin V.V., Gulyaev A.I. Study of the structure and properties of a polymer composite material with an integrated vibration-absorbing layer. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2020, no. 3, pp. 2–9.
3. Kablov E.N., Startsev V.O. Systematical analysis of the climatic influence on mechanical properties of the polymer composite materials based on domestic and foreign sources (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
4. Mukhametov R.R., Petrova A.P. Thermosetting binders for polymer composites (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
5. Sorokin A.E., Ivanov M.S., Sagomonova V.A. Thermoplastic polymer composite materials based on polyetheretherketones of various manufacturers. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 7, 2022). DOI: 10.18577/2071-9140-2022-0-1-41-50.
6. Grinevich D.V., Yakovlev N.O., Slavin A.V. The criteria of the failure of polymer matrix composites (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 7 (79), paper no. 11. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: July 5, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-92-111.
7. Saleh M.N., Soutis C. Recent advancements in mechanical characterisation of 3D woven composites. *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*, 2017, no. 3, pp. 1–17. DOI: 10.1186/s40759-017-0027-z.
8. Belinis P.G., Donetskii 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.
9. Tong L., Mouritz A.P., Bannister M.K. *3D Fibre Reinforced Polymer Composites*. Elsevier Science, 2002. 254 p.
10. Muller J., Zulliger A., Dorn M. Economic production of composite beams with 3D fabric tapes. *Textile Month*, 1994, September, pp. 9–13.
11. Mouritz A.P., Bannister M.K., Falzon P.J., Leong K.H. Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1999, vol. 30, is. 12, pp. 1445–1461. DOI: 10.1016/S1359-835X(99)00034-2.
12. Labanieh A.R., Legrand X., Koncar V., Soulat D. Development in the multiaxis 3D weaving technology. *Textile Research Journal*, 2015, no. 86, pp. 1–16. DOI: 10.1177/0040517515612365.

13. Curiskis J.I., Durie A., Nicolaidis A., Herszberg I. Developments in multiaxial weaving for advanced composite materials. *Proceedings of ICCM-11*, 1997, vol. 5, pp. 86–96.
14. Labanieh A.R., Legrand X., Koncar V., Soulat D. Novel optimization method to estimate the geometrical properties of a multiaxial 3D woven preform. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2013, no. 32, pp. 3–16. DOI: 10.1177/0731684412472746.
15. *3D Weaving*. Available at: <https://www.3dweaving.com/en/products/distance-fabrics/constant-height> (accessed: July 05, 2022).
16. Li X., He X., Liang J. et al. Research Status of 3D Braiding Technology. *Applied Composite Materials*, 2022, no. 29, pp. 147–157. DOI: 10.1007/s10443-021-09963-2.
17. Khayale J. *Development of 3D Braiding Concept for Multi-Axial Textile Preforms*: PhD Thesis. Textile Composite Group School of Materials. 2015. 188 p. Available at: https://www.researchgate.net/publication/354561676_Research_Status_of_3D_Braiding_Technology (accessed: July 05, 2022).
18. Zhang M., Sun B., Hu H., Gu B. Dynamic Behavior of 3D Biaxial Spacer Weft-Knitted Composite T-Beam Under Transverse Impact. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2009, no. 16 (5), pp. 356–370. DOI: 10.1080/15376490802710761.
19. Tanaka K., Ushiyama R., Katayama T. et al. Formability evaluation of carbon fiber NCF by a non-contact 3D strain measurement system and the effects of blank folder force on its formability. *High Performance and Optimum Design of Structures and Materials*, 2014, vol. 137, pp. 317–326.
20. Beckworth S.W., Hyland C.R. Resin transfer moulding: a decade of technology advances. *Society for the Advancement of Material and Process Engineering Journal*, 1998, no. 34, pp. 7–19.
21. Schornstein B., Staschko R., Fuchs N., Glück N. Manufacturing Principles for Z-Pin Reinforced FRP Composite Laminates in the Case of Bolted Joints. *Lightweight Design Worldwide*, 2017, no. 10 (3), pp. 28–33. DOI: 10.1007/s41777-017-0025-1.
22. Klopp K., Moll K.-U., Wulfhorst B. Stitching process with one-sided approach of the textile for the production of reinforcing textiles for composites and other technical textiles. *The 5th International Conference on Textile Composites*, 2000, pp. 67–70.
23. Mouritz A.P. Review of z-pinned composite laminates. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007, no. 38, pp. 2383–2397.
24. Chang P., Mouritz A.P., Cox B.N. Properties and failure mechanisms of z-pinned laminates in monotonic and cyclic tension. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2006, no. 37 (10), pp. 1501–1513. DOI: 10.1016/j.compositesa.2005.11.013.
25. Chang P., Mouritz A.P., Cox B.N. Flexural properties of z-pinned laminates. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007, no. 38 (2), pp. 244–251. DOI: 10.1016/j.compositesa.2006.05.004.

Информация об авторах

Славин Андрей Вячеславович, начальник Научно-исследовательского отделения, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Силкин Андрей Николаевич, генеральный директор, АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», info@technologiya.ru

Гриневич Дмитрий Владимирович, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Яковлев Николай Олегович, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Andrey V. Slavin, Head of Scientific-Research Bureau, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Andrey N. Silkin, Director General, JSC ORPE «Technologiya» named after A.G. Romashin», info@technologiya.ru

Dmitry V. Grinevich, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Nikolay O. Yakovlev, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 25.07.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 27.07.2022.
The article was submitted 25.07.2022; approved and accepted for publication after reviewing 27.07.2022.