



УДК 678.8

doi: 10.18577/2307-6046-2015-0-9-10-10

**ОБЪЕМНЫЕ ТЕКСТИЛЬНЫЕ ПРЕФОРМЫ,
ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ (обзор)**

К.И. Донецкий
кандидат химических наук

А.Е. Раскутин
кандидат технических наук

П.А. Хилов

Ю.В. Лукьяненко

П.Г. Белинис
кандидат технических наук

А.А. Коротыгин

Сентябрь 2015

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

УДК 678.8

doi: 10.18577/2307-6046-2015-0-9-10-10

*К.И. Донецкий¹, А.Е. Раскутин¹, П.А. Хилов²,
Ю.В. Лукьяненко³, П.Г. Белинис³, А.А. Коротыгин⁴*

ОБЪЕМНЫЕ ТЕКСТИЛЬНЫЕ ПРЕФОРМЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ (обзор)

В настоящее время технология безавтоклавного изготовления полимерных композиционных материалов (ПКМ) с использованием текстильных плетеных и тканых объемных преформ освоено рядом зарубежных компаний и находит применение в аэрокосмическом машиностроении. Такие ПКМ характеризуются значительным сопротивлением к расслаиванию, высокими показателями долговечности, высокой прочностью в зоне концентраторов напряжений. Использование преформ позволяет упростить проблему соединений в сборных конструкциях, обеспечить возможность автоматизации производства.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, объемные текстильные преформы, безавтоклавное формование, плетение, 3D-ткачество.

*K.I. Donetskii¹, A.E. Raskytin¹, P.A. Hilov²,
Yu.V. Lykianenko³, P.G. Belinis³, A.A. Korotigin⁴*

BRAIDING AND WOVEN TEXTILE PREFORMS FOR THE MANUFACTURING FIBER REINFORCED PLASTICS (REVIEW)

Currently, technology without the autoclave manufacturing fiber reinforced plastics with use as braiding and woven volume preform, it is mastered by number of the foreign companies, and finds application in space mechanical engineering. Such materials are characterized by considerable resistance to stratifying, high fatigue indicators, high strength in zone of concentrators of tension. Use volume preform allows to simplify problem of connections in combined designs, to provide possibility of automation of production.

Keywords: polymeric composite materials, volume preformes, without the autoclave manufacturing, braiding, 3D-weaving.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

²Казанский национальный исследовательский университет им. А.Н. Туполева [Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev] E-mail: kai@kai.ru

³Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное текстильное предприятие „Текстор”» [Limited liability company «Research and production textile company „Textor”»] E-mail: textor2010@yandex.ru

⁴Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение „Сатурн”» [Joint stock company «Research and production association „Saturn”»] E-mail: saturn@npo-saturn.ru

Введение

Современный рынок композиционных материалов ставит перед разработчиками и производителями изделий из высокотехнологичных материалов целый ряд сложных задач, которые определяются не только особенностями конструкции изделия и технологией его изготовления, но и необходимостью обеспечения ряда специфических свойств, таких как точное соответствие производимого изделия заданной внешней форме, устойчивость к деформационным разнонаправленным нагрузкам, изотропность или, наоборот, при необходимости – градиентность свойств, снижение массы конструкций при сохранении высоких эксплуатационных свойств.

Одним из путей решения данной задачи является применение новых полимерных композиционных материалов (ПКМ) в элементах конструкций, что в свою очередь требует как разработки новых материалов и технологий, так и сокращения трудоемкости технологических процессов, их автоматизации и роботизации [1–4].

Материалы и методы

В последние десятилетия одновременно с разработкой новых высокопрочных волокон активно развивались и новые текстильные технологии, что в свою очередь привело к появлению новых армирующих систем и позволило применять в производстве ПКМ объемные преформы, создаваемые как способом плетения, так и ткачества. Изготовление конструкций сложного профиля с помощью стандартных технологий становится проблематичным по причине сложности раскроя заготовок препрегов и необходимости применения ручной выкладки в зонах сложных переходов. Одним из вариантов решения данной проблемы является использование объемных армирующих преформ, которые характеризуются высокой подвижностью нитей и способны создавать криволинейные поверхности сложной формы [5].

Технология изготовления ПКМ с помощью объемно-армирующих преформ имеет значительные преимущества: сокращение цикла изготовления сложнопрофильных

деталей, снижение производственных расходов благодаря механизации процесса и уменьшения доли ручного труда, возможность применения в серийном производстве. Технология позволяет за один технологический цикл формования получать готовые детали без применения дополнительных приспособлений для намотки или выкладки материала.

Поскольку именно армирующий элемент является основным компонентом, определяющим механические свойства изделия из ПКМ, важную роль играет как материал преформы, так и ориентация ее структуры в пространстве. Преимущество использования именно объемно-армирующих преформ состоит и в том, что технология их изготовления позволяет за одну операцию получать изделие с заданными параметрами (длина, ширина, толщина). Это обеспечивает получение материалов, характеризующихся повышенными механическими свойствами, а также разнообразием геометрических форм и стабильностью размеров. ПКМ, выполненные безавтоклавным формованием на основе объемно-армирующих преформ, обладают такими физико-механическими характеристиками, как значительное сопротивление к расслаиванию, повышенное сопротивление повреждениям, улучшенное сопротивление удару, высокие показатели долговечности, высокая прочность вблизи отверстий и крепежных элементов [6–8].

Существуют два основных способа создания объемно-армирующих преформ с использованием технологий текстильных производств: ткачество и плетение. Для реализации этих возможностей и создания современных материалов, обладающих спектром новых и даже уникальных свойств, необходима совместная работа специалистов по технологии и проектированию текстильных материалов, по технологии практического изготовления текстильных изделий, а также специалистов в области изготовления непосредственно ПКМ, проектировщиков и конструкторов изделий.

Плетеные преформы представляют собой полуфабрикат в виде «мягкого рукава», ткани или многослойной оплетки оправки, при необходимости – переменного диаметра. Материал для изготовления такой преформы может быть разным: углеродное волокно, стекловолокно или при необходимости – волокно природного происхождения.

На рис. 1 показан принцип изготовления плетеных преформ. Оборудование позволяет выпускать преформы как в виде рукава, так и в виде ленты (ткани), замыкая или размыкая линию движения веретен. Отдельно расположена вытяжная машина с установленной скоростью наматывания на приемный барабан готовой продукции. Изготовление же объемной оплетки и многослойных преформ несколько отличается. В данном

случае дополнительно требуется устройство, позволяющее многократно проводить оплетаемую оснастку через плетельную машину. Обычно для этого используется программируемый робот, но встречаются и иные технологические решения.

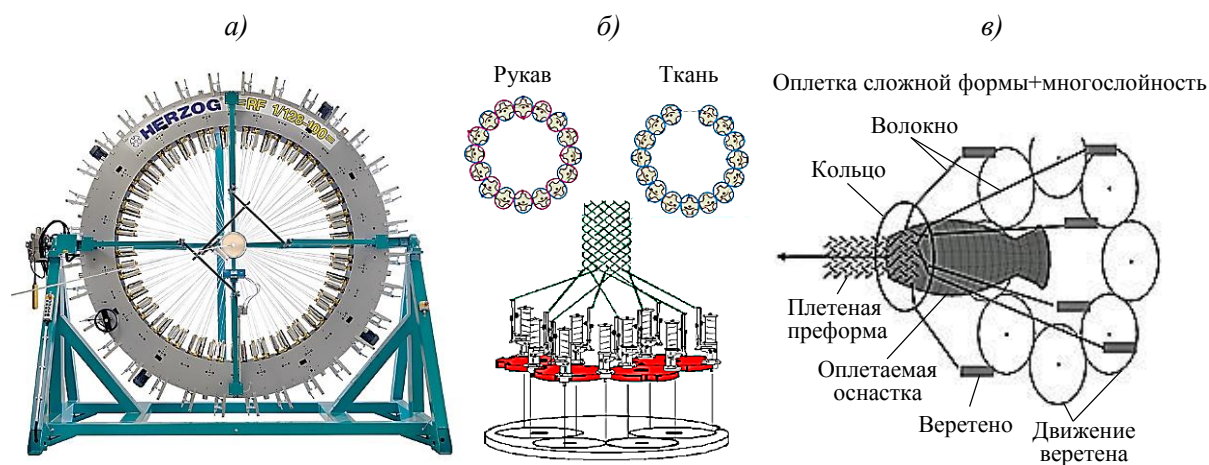


Рисунок 1. Изготовление плетеных преформ, рукава (ленты) или многослойной оплетки с использованием специализированной оснастки фирм Herzog Maschinenfabrik (а); Niederrhein University of Applied Sciences (б); Mönchengladbach, Dept. of Textile and Clothing Technology (в)

Существуют две основные схемы армирования, применяемые при изготовлении плетеных преформ – биаксиальная и триаксиальная (рис. 2). Угол армирования плетеной преформы напрямую влияет на будущие свойства ПКМ, изготовленного на основе этого материала. Варьируя угол, можно получать те или иные свойства, которые необходимы в конкретной конструкции, в зависимости от вида нагрузки – кручение, сдвиг, сжатие или сложные комбинации этих нагрузок. С увеличением угла плетения уменьшаются прочность и модули при растяжении и сжатии при приложении нагрузки в нулевом направлении. При приложении нагрузки в направлении 90 град наблюдается увеличение прочности и модулей упругости при растяжении и сжатии. Это позволяет изготавливать преформу, схема армирования которой оптимально адаптирована к виду нагрузки будущей конструкции [9, 10].



Рисунок 2. Схемы плетеных преформ с биаксиальным (а) и триаксиальным (б) направлениями армирования

Варианты формирования заготовок из преформ могут быть самыми разнообразными. Так, плетеные преформы обладают высокой подвижностью нитей и способны создавать криволинейные поверхности сложной формы путем легкой деформации в необходимый потребителю профиль, такой как швеллер, J-, T- и Z-образные профили или др. В преформу-рукав можно вставить необходимую оправку и затем изготовить требуемую деталь методами RTM, VaRTM, VARI, SCRIMP и др.

В настоящее время за рубежом использование технологии плетения широко освоено компаниями SGL Group (Германия), Eurocarbon (Нидерланды), SILTEX (Германия), A&P Technology (США) и другими для изготовления преформ, используемых для производства стрингеров, шпангоутов, несущих конструкций самолетов, лопастей винтов, элементов фюзеляжа и шасси, направляющих лопаток и корпусов вентилятора авиадвигателя.

Основные потребители плетеных преформ за рубежом – лидеры авиастроения, такие как фирмы General Electric Aircraft Engines, Snecma, Boeing, Airbus. Данная технология используется при производстве элементов мотогондолы, лонжеронов, шпангоутов (рис. 3), лопастей винтов, различных корпусных элементов и многого другого. В ракетостроении освоено производство корпусов ракет (рис. 4), в машиностроении – это опорные элементы крыши и бамперов, колесные диски (фирмы BMW и Mercedes), топливные баки и баллоны высокого давления. Разрабатываются также технологии производства автомобильных рам и прицепов, в строительстве – перспективно использование плетеных преформ в конструкциях мостов, шпунтов, опор линий электропередач и освещения [11–13].

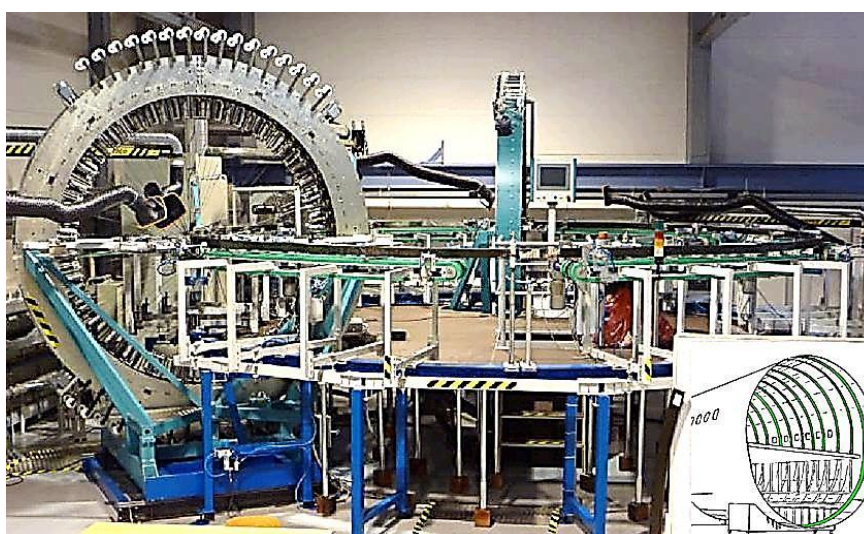


Рисунок 3. Комплекс по производству шпангоутов фирмы EADS (Германия)



Рисунок 4. Применение плетеных преформ при изготовлении фюзеляжа ракет (компания Fiber Innovations)

Несмотря на видимые преимущества, в России технологии безавтоклавного изготовления ПКМ с применением плетеных преформ только развиваются и широкого развития в настоящее время не получили. Ряд попыток освоения этой технологии в последние годы привел к изготовлению ряда опытных образцов, таких как трубчатые элементы рам, элементы конструкций космических обсерваторий и спутников, валы приводов (рис. 5).



Рисунок 5. Образцы изделий с плетеной армирующей основой, изготовленных в КНИТУ-КАИ (Россия)

Таким образом, технология плетения позволяет получать за одну операцию преформы для изделий с заданными параметрами (длина, ширина, толщина); изготавливать материалы с разнообразными геометрическими формами и стабильностью размеров; производить плетеные преформы или ткани практически неограниченной длины из разнообразных волокон, с заданным углом армирования и возможностью укладки нити в нулевом направлении и многое другое.

Потенциал возможностей технологии *технического ткачества* при изготовлении объемных преформ для производства армирующих структур ПКМ пока мало известен в России и, к сожалению, востребован ограниченно. Одной из причин этого является утрата многих связей в отечественном научном сообществе в 90-е годы прошлого века. Сложность технологии и необходимость использования специального нестандартного оборудования не позволяют пока сделать технологию изготовления тканых объемно-армирующих преформ массовой и легкодоступной. За рубежом исследования в области проектирования, изготовления и исследования свойств тканых объемно-армирующих преформ и материалов на их основе ведутся различными фирмами и институтами, такими как Albany Engineered Composites (США), Tomi-Tex (Япония), BPM (США), 3TEX (США), 3D Wovens (Турция), Bally Ribbon Mills (США), J.H. Vom Baur Sohn GmbH & Co. KG (Германия) [14, 15].

В отличие от плетеных объемных преформ, которые представляют собой многослойную структуру, изготовление преформ методом ткачества позволяет создавать реальную трехмерную структуру – два или более набора нитей (основа и уток) переплетаются между собой, образуя ткань. Образование третьей оси осуществляется подачей дополнительных нитей основы и утка в направлении приращения толщины (рис. 6) [16].

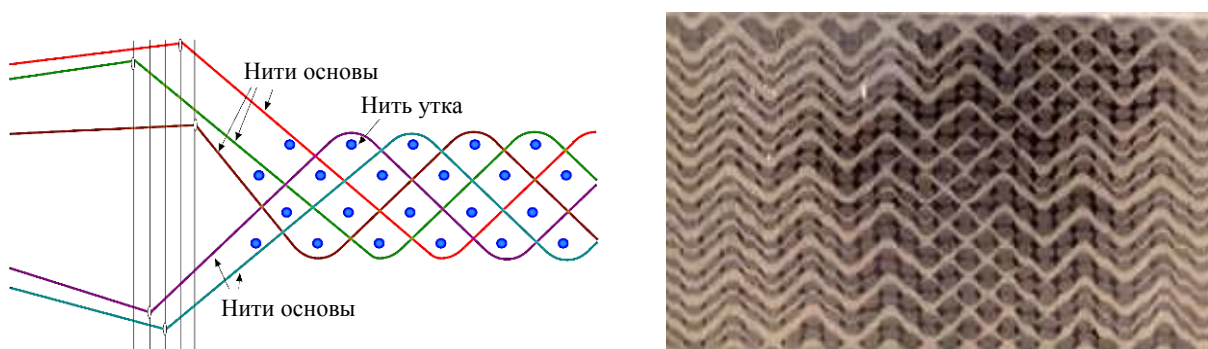


Рисунок 6. Схема трехмерного ткачества и структура полимерного композиционного материала на основе тканой преформы (фирмы General Electric и Snecma)

В настоящее время существуют два основных подхода к объемному ткачеству, определяющихся выбором станка для производства преформы – это широкие ткацкие станки («широкое» ткачество) или лентоткацкие («узкое» ткачество) (рис. 7). Эти ткацкие станки, в свою очередь, подразделяются на челночные и бесчелночные.

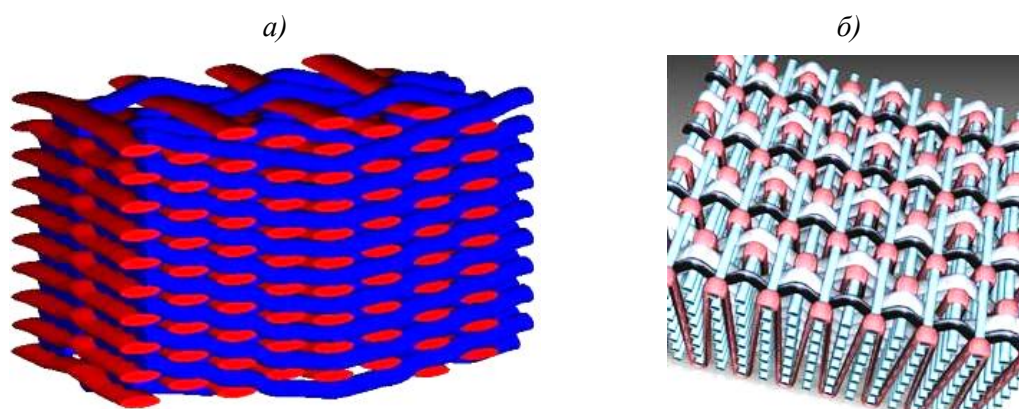


Рисунок 7. Структуры, получаемые методами «широкого» (а) и «узкого» (б) ткачества (фирма ЗТЕХ)

В «широком» ткачестве подавляющее большинство станочного парка в России представляют высокопроизводительные *бесчелночные ткацкие станки*. Но эти станки прокладывают уточную нить отрезками, равными ширине ткани, т. е. каждый раз уточная нить, прокладываемая через ткацкий зев, обрезается. Поэтому по краям ткани сложное трехмерное переплетение будет рассыпаться и необходимо края (кромки) ткани делать нетрехмерными переплетениями, чтобы закрепить концы уточных (поперечных) нитей и предотвратить рассыпание краев ткани. Получить цельнотканую объемную преформу практически невозможно, так как ее придется вырезать из центральной части объемного тканого полотна, полученного на ткацком станке, а значит – структура 3D-армирования не будет полноценной.

На *широких челночных ткацких станках* можно получать объемные преформы в виде цельнотканых панелей с четко сформированными краями и шириной, соответствующей ширине станка. Однако это очень сложная технологическая задача, особенно для углеродных, стеклянных, кварцевых нитей, которые будут повреждаться свободно летающим челноком.

Бесчелночные узкие (лентоткацкие) станки мало пригодны для трехмерных тканых изделий, так как рапира вводит уточную нить в виде петли и с одной стороны имеет трикотажное закрепление на одном уровне, т. е. механизм станка без его изменения не позволяет изготавливать объемные преформы.

Наиболее оптимальными для получения цельнотканых объемно-армирующих преформ являются *челночные лентоткацкие станки*. При челночном ткачестве уточная

нить является непрерывной. Она разворачивается на краю изделия и идет в следующий зев, поэтому тканое изделие получается полностью сформированным и стянутым единой бесконечной уточной нитью. Челночное ткачество – благодаря развороту непрерывной уточной нити – позволяет формировать сложные цельнотканые трехмерные изделия с вертикальными или наклонными краями (стенками). Другое достоинство челночных лентоткацких станков в том, что челнок перемещается механически, по четкой всегда одинаковой траектории и не имеет стадии полета. Это позволяет настроить технологический процесс так, что челнок не будет прикасаться к нитям основы и деформировать их. Для работы с углеродными, стеклянными и кварцевыми нитями это особенно важно, так как позволяет максимально сохранить физико-механические свойства этих нитей в готовом изделии (цельнотканой преформе).

Таким образом, «узкое» челночное ткачество характеризуется тем, что уточная нить не обрезается после прохождения через всю ширину преформы, а проходит через следующий зев и тем самым получается преформа с замкнутыми нитями. Методом «узкого ткачества» возможно получить любую структуру переплетения, в том числе и ортогональную, где основные и уточные нити не изогнуты.

Возможным направлением перспективных разработок объемно-армирующих преформ является получение более сложных по структуре объемно-профильных преформ, которые имеют единую взаимосвязанную структуру из взаимно переплетенных армирующих нитей. При этом внутренние каналы могут иметь треугольный, прямоугольный либо другой профили [17].

Изделия на основе объемных тканых преформ могут иметь как округлые, так и четкие граненые формы и выступающие элементы или углубления достаточно сложной геометрической формы, с вертикальными или наклонными поверхностями. Применение цельнотканых объемных преформ для изготовления лопаток вентилятора авиационного газотурбинного двигателя (ГТД) вполне успешно реализовано консорциумом General Electric и Snecma для двигателя LEAP-X. На рис. 8 показаны этапы производства таких лопаток.

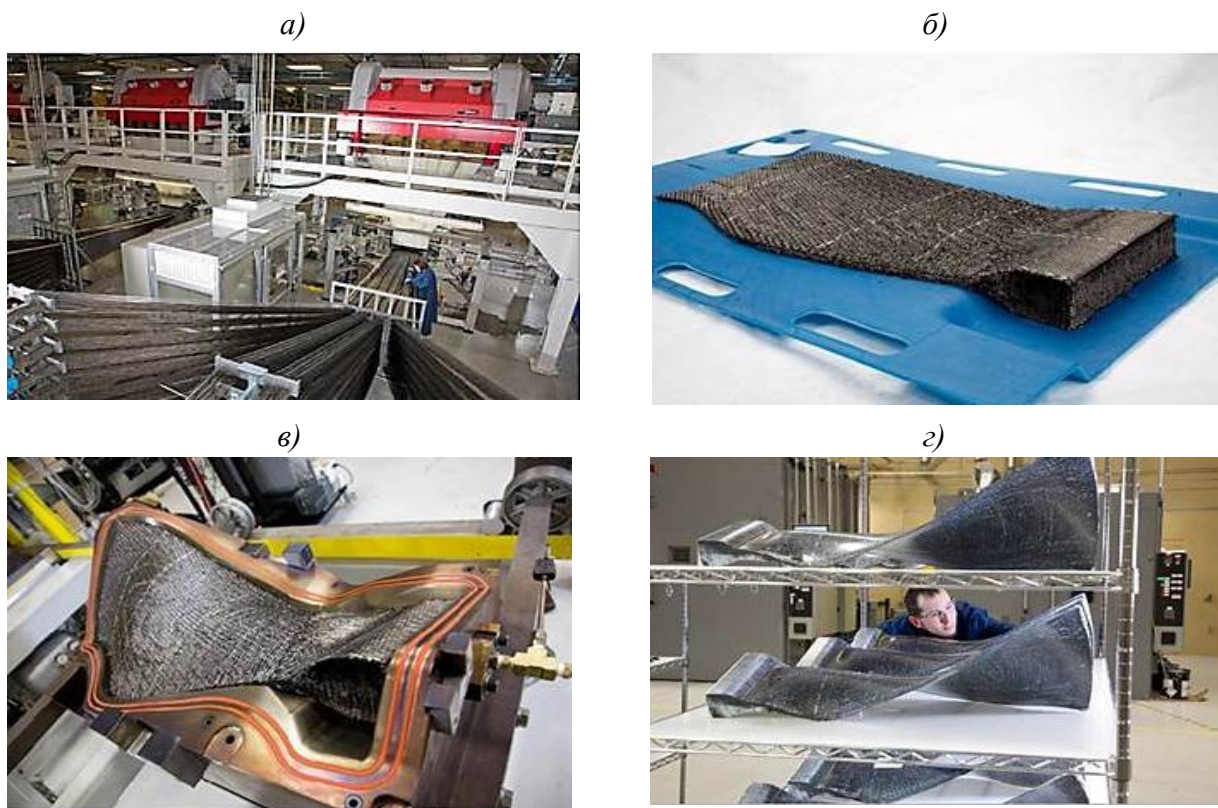


Рисунок 8. Этапы производства лопаток вентилятора для авиационного ГТД:
а – ткачество преформы; *б* – готовая преформа; *в* – преформа в оснастке для RTM; *г* – отформованная лопатка

В отличие от лопатки, изготовленной для двигателя GE90 методом ручной выкладки препрега и автоклавным формованием, которая подвержена расслоениям и имеет низкую стойкость к ударным нагрузкам и усталостному разрушению, лопатка, выполненная на основе объемной тканой преформы, обладает более высокими механическими свойствами по толщине, в гораздо меньшей степени подвержена расслоению и обладает лучшими прочностными свойствам при попадании посторонних предметов [18].

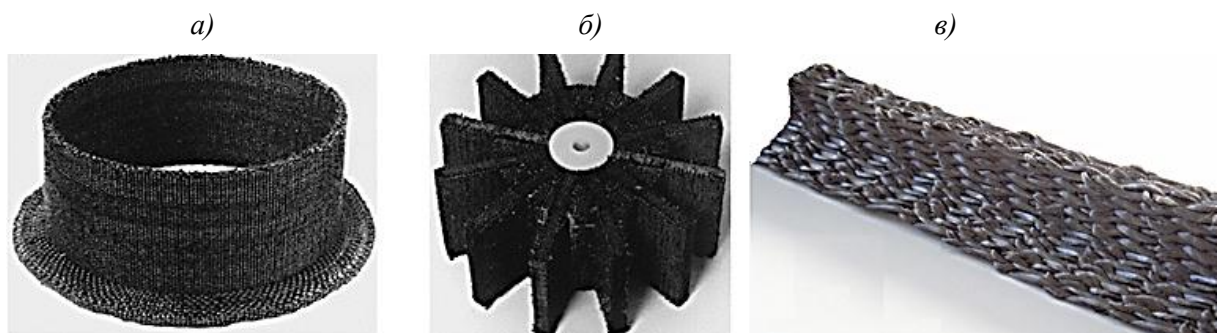


Рисунок 9. Примеры трехмерных преформ: корпус (а), крыльчатка (б) и элемент конструкции (в)

О перспективности метода объемного ткачества говорит то, что изготовление высоко- и сложнагруженных деталей из ПКМ для авиационных двигателей, элементов конструкций, стрингеров и шпангоутов планера и других элементов конструкций затруднительно, а в ряде случаев невозможно без применения объемных армирующих структур. На рис. 9 показаны объемные тканые преформы корпуса, крыльчатки и элемента конструкции.

Заключение

Таким образом, если технологии изготовления ПКМ на основе плетеных преформ можно считать в основном реализованными в различных областях промышленности, использующей изделия из ПКМ, то тканые преформы применяются более редко, хотя являются исключительно перспективными. Реализация в современном наукоемком производстве объемных плетеных и тканых преформ приводит к получению изделий с заданными физико-механическими свойствами, уменьшению трудоемкости и стоимости изделий из ПКМ, с перспективой автоматизации производства. Развитие и применение данных решений в высокотехнологичных отраслях российской промышленности позволит придать дополнительный импульс для изготовления новых образцов техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
2. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
3. Тимошков П.Н., Коган Д.И. Современные технологии производства полимерных композиционных материалов нового поколения //Труды ВИАМ. 2013. №4 (viam-works.ru).
4. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад //Наука и жизнь. 2010. №4. С. 2–7.
5. Донецкий К.И., Хрульков А.В., Коган Д.И., Белинис П.Г., Лукьяненко Ю.В. Применение объемно-армирующих преформ при изготовлении изделий из ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 35–39.

6. Composition of and method for making high performance resins for infusion and transfer molding processes: pat. 6359107 US; publ. 19.03.2002.
7. Постнова М.В., Постнов В.И. Опыт развития безавтоклавных методов формования ПКМ //Труды ВИАМ. 2014. №4. Ст. 06 (viam-works.ru).
8. Roberts G.D., Pereira J.M., Revilock D.M., Binienda W.K., Xie Ming. Ballistic Impact of Braided Composites With a Soft Projectile //J. Aerospace Eng. 2005. V. 18. №1. P. 3–7.
9. Okano M., Sugimoto K., Saito H. et al. Effect of the braiding angle on the energy absorption properties of a hybrid braided FRP tube /Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part L. 2005. V. 219. №1. P. 59.
10. Erber A., Birkefeld K., Drechsler K. The influence of braiding configuration on damage tolerance of drive shafts /In: SAMPE EUROPE 30-th international Jubilee Conference and Forum. Paris. 2010. P. 364–371.
11. Braided reinforcement for aircraft fuselage frames and method of producing the same: pat. 8210086B2 US; publ. 03.07.2012.
12. Донецкий К.И., Коган Д.И, Хрульков А.В. Использование технологий плетения при производстве элементов конструкций из ПКМ //Труды ВИАМ. 2013. №10. Ст. 04 (viam-works.ru).
13. Власенко Ф.С., Раскутин А.Е., Донецкий К.И. Применение плетеных преформ для полимерных композиционных материалов в гражданских отраслях промышленности (обзор) //Труды ВИАМ. 2015. №1. Ст. 05 (viam-works.ru).
14. Mohamed M.H., Bogdanovich A.E. Comparative analysis of different 3D weaving processes, machines and products /In: ICCM 17, 3D Textiles & Composites. Edinburgh. 2009.
15. McClain M., Goering J. Overview of Recent Developments in 3D Structures /In: ICCM 17, 3D Textiles & Composites. Edinburgh. 2009.
16. Potluri P., Sharif T., Jetavat D., Aktas A., Choudhry R., Hogg P. Bench-marking of 3D Preforming Strategies. University of Manchester. 2012.
17. Тканая лента сложной геометрической конфигурации для объемных армированных композиционных изделий: пат. 2459894 Рос. Федерация; опубл. 27.08.2012.
18. Lomov S.V., Ivanov D.S., Perie G., Verpoest I. Modelling 3D-fabrics and 3D-reinforced Composites /In: Challenges and Solutions. World Conference on 3D-fabrics. Manchester. 2008.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Aviakosmicheskoe materialovedenie [Aerospace materials science] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocnik. 2008. №3. S. 2–14.
2. Kablov E.N. Himija v aviacionnom materialovedenii [Chemistry in aviation materials science] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2010. T. LIV. №1. S. 3–4.
3. Timoshkov P.N., Kogan D.I. Sovremennye tehnologii proizvodstva polimernyh kompozicionnyh materialov novogo pokolenija [Modern production technologies of polymeric composite materials of new generation] //Trudy VIAM. 2013. №4 (viam-works.ru).
4. Kablov E.N. Shestoj tehnologicheskij ukklad [Sixth technological way] //Nauka i zhizn'. 2010. №4. S. 2–7.
5. Doneckij K.I., Hrul'kov A.V., Kogan D.I., Belinis P.G., Luk'janenko Ju.V. Primenenie ob'emno-armirujushhijh preform pri izgotovlenii izdelij iz PKM [Application volume reinforcing preform when manufacturing products from PKM] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №1. S. 35–39.
6. Composition of and method for making high performance resins for infusion and transfer molding processes: pat. 6359107 US; pabl. 19.03.2002.
7. Postnova M.V., Postnov V.I. Opyt razvitija bezavtoklavnyh metodov formovanija PKM [Experience of development of bezavtoklavny methods of formation of PKM] //Trudy VIAM. 2014. №4. St. 06 (viam-works.ru).
8. Roberts G.D., Pereira J.M., Revilock D.M., Binienda W.K., Xie Ming. Ballistic Impact of Braided Composites With a Soft Projectile //J. Aerospace Eng. 2005. V. 18. №1. P. 3–7.
9. Okano M., Sugimoto K., Saito H. et al. Effect of the braiding angle on the energy absorption properties of a hybrid braided FRP tube /Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part L. 2005. V. 219. №1. P. 59.
10. Erber A., Birkefeld K., Drechsler K. The influence of braiding configuration on damage tolerance of drive shafts /In: SAMPE EUROPE 30-th international Jubilee Conference and Forum. Paris. 2010. P. 364–371.
11. Braided reinforcement for aircraft fuselage frames and method of producing the same: pat. 8210086B2 US; pabl. 03.07.2012.
12. Doneckij K.I., Kogan D.I., Hrul'kov A.V. Ispol'zovanie tehnologij pletenija pri proizvodstve jelementov konstrukcij iz PKM [Use of technologies of weaving by production of elements of designs from PKM] //Trudy VIAM. 2013. №10. St. 04 (viam-works.ru).
13. Vlasenko F.S., Raskutin A.E., Doneckij K.I. Primenenie pletenyh preform dlja polimernyh kompozicionnyh materialov v grazhdanskih otrasljah promyshlennosti (obzor) [Appli-

cation wattled preform for polymeric composite materials in civil industries of the industry (review)] //Trudy VIAM. 2015. №1. St. 05 (viam-works.ru).

14. Mohamed M.H., Bogdanovich A.E. Comparative analysis of different 3D weaving processes, machines and products /In: ICCM 17, 3D Textiles & Composites. Edinburgh. 2009.
15. McClain M., Goering J. Overview of Recent Developments in 3D Structures /In: ICCM 17, 3D Textiles & Composites. Edinburgh. 2009.
16. Potluri P., Sharif T., Jetavat D., Aktas A., Choudhry R., Hogg P. Bench-marking of 3D Preforming Strategies. University of Manchester. 2012.
17. Tkanaja lenta slozhnoj geometricheskoj konfiguracii dlja ob'emnyh armirovannyh kompozicionnyh izdelij [Woven tape of difficult geometrical configuration for the volume reinforced composition products]: pat. 2459894 Ros. Federacija; opubl. 27.08.2012.
18. Lomov S.V., Ivanov D.S., Perie G., Verpoest I. Modelling 3D-fabrics and 3D-reinforced Composites /In: Challenges and Solutions. World Conference on 3D-fabrics. Manchester. 2008.