

К.И. Донецкий<sup>1</sup>, А.В. Хрульков<sup>1</sup>, Д.И. Коган<sup>1</sup>,  
П.Г. Белинис<sup>2</sup>, Ю.В. Лукьяненко<sup>3</sup>

## ПРИМЕНЕНИЕ ОБЪЕМНО-АРМИРУЮЩИХ ПРЕФОРМ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПКМ

*В настоящее время технология безавтоклавного изготовления ПКМ с использованием объемно-армирующих преформ освоена рядом зарубежных компаний и находит применение в аэрокосмическом машиностроении. Такие ПКМ характеризуются значительным сопротивлением к расслаиванию, высокими показателями выносливости, высокой прочностью вблизи отверстий. Использование объемно-армирующих преформ позволяет упростить проблему соединений в сборных конструкциях, обеспечить возможность автоматизации производства.*

**Ключевые слова:** композиционные материалы, объемно-армирующие преформы, безавтоклавные методы формования.

К.И. Donetsky<sup>1</sup>, A.V. Khrulkov<sup>1</sup>, D.I. Kogan<sup>1</sup>,  
P.G. Belinis<sup>2</sup>, Yu.V. Lukyanenko<sup>3</sup>

## USE OF THREE-DIMENSIONAL REINFORCING PREFORMS DURING THE PRODUCTION OF POLYMER COMPOSITE PRODUCTS

*The PCM autoclave-free production technology with the use of three-dimensional reinforcing preforms has been recently mastered by a number of foreign companies and finds an application in the aircraft building. Such PCMs are characterized by the high exfoliation resistance and endurance values, including the high strength near the holes. The use of three-dimensional preforms allows to simplify the problem of joining in the built-up structures and to ensure the possibility of production automatization.*

**Keywords:** composite materials, three-dimensional preforms, autoclave-free moulding methods.

---

<sup>1</sup> Федеральное 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

<sup>2</sup> Димитровский инженерно-технологический институт филиал НИЯУ МИФИ (г. Димитровград, Ульяновская область). [Dimitrov Institute of Engineering and Technology] E-mail: p.belinis2010@yandex.ru

<sup>3</sup> Общество с ограниченной ответственностью научно-производственное предприятие «Авиационный текстиль» (г. Казань) [Limited Liability Company Scientific-Production Enterprise «Aviation textiles»] E-mail: Gelvaly1@yandex.ru

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 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].

Развитие аэрокосмического машиностроения показало, что применение стандартной автоклавной технологии с использованием препрегов в процессе производства

позволяет значительно снизить массу деталей при общем уменьшении затрат, сократить цикл изготовления и механической обработки изделий (по сравнению с более старыми технологиями без применения ПКМ). К еще большему сокращению затрат приводит использование активно развивающихся за рубежом безавтоклавных технологий, одной из которых является технология пропитки связующим собранных в пакет предварительно созданных заготовок – преформ из сухих армирующих волокон. Такие преформы могут быть получены и машинным способом, с предварительным расчетом заданных свойств путем математического моделирования. Кроме того, такая технология – по сравнению с традиционными технологиями изготовления деталей из ПКМ, используемыми в аэрокосмической отрасли, – имеет два значительных технологических преимущества: уменьшение трудоемкости изготовления изделия и замена сложного и дорогого автоклавного формования на более простые и дешевые способы формования.

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 заготовки (преформы), создаваемые как способами плетения, так и ткачества. Изготовление конструкций сложного профиля стандартными технологиями становится проблемным по причине сложности раскроя заготовок препрегов и необходимости применения ручной выкладки в зонах сложных переходов, получение же трехмерно-армированных заготовок из препрегов практически сложно осуществимо. Одним из вариантов решения данной проблемы является использование объемных армирующих преформ, которые характеризуются высокой подвижностью нитей и способны создавать криволинейные поверхности сложной формы.

Технология изготовления ПКМ с помощью объемно-армирующих преформ имеет такие значительные преимущества, как сокращение цикла изготовления сложнопрофильных деталей, снижение производственных расходов путем 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. Например, применение объемно-армирующих преформ, выполненных плетением, при производстве многослойных трубчатых конструкций позволяет исключить операцию намотки, что, в свою очередь, приведет к уменьшению трудоемкости производства (рис. 1).

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 на основе объемно-армирующих преформ обладают такими физико-механическими характеристиками, как значительное сопротивление к расслаиванию, повышенное сопротивление к повреждениям, улучшенное сопротивление к удару, высокие показатели выносливости, высокая прочность вблизи отверстий и крепежных элементов. Кроме того, использование объемно-армирующих преформ позволяет упростить соединения в сборных конструкциях, так как прочность традиционных соединений значительно уступает прочности самой конструкции.

Виды объемно-армирующих преформ разнообразны и включают:

- преформы переменной толщины и переменного контура;
- преформы с выпуклостями и вогнутостями как по всей поверхности, так и в отдельных ее местах;

- преформы, имеющие ребра, которые в дальнейшем могут быть развиты в стрингеры и другие элементы жесткости;
- преформы с каналами на поверхности и внутри самой структуры, причем каналы могут иметь разные геометрические формы;
- преформы в виде полых трубчатых рукавов;
- преформы в виде сплошных цилиндров;
- преформы в виде стержней прямоугольного сечения и многое другое.

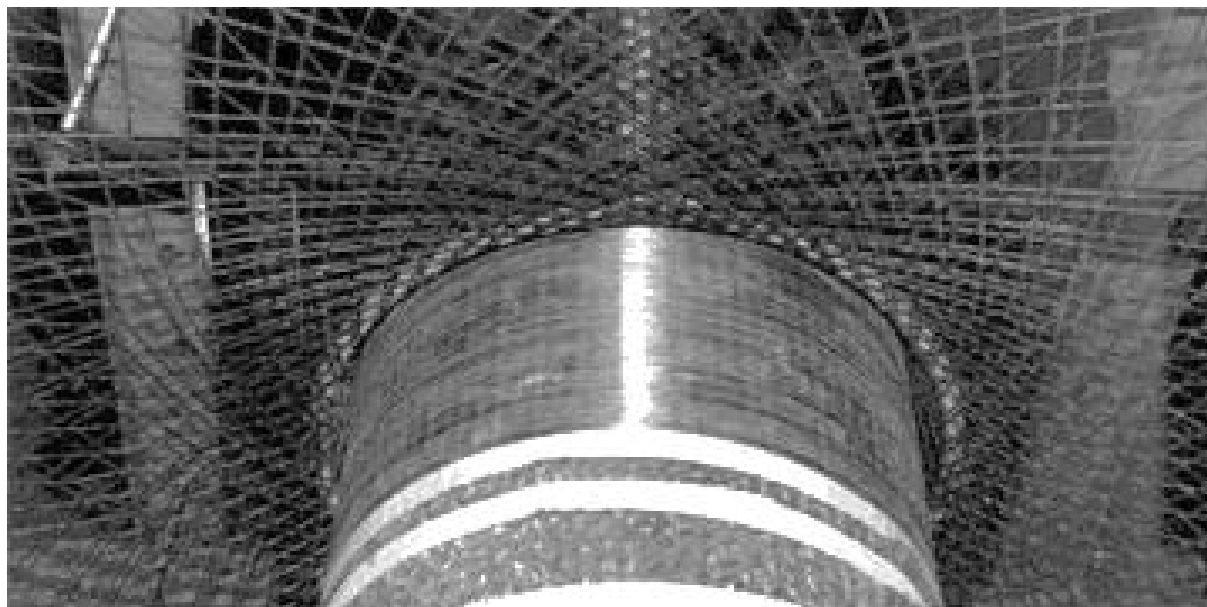


Рис. 1. Заготовка, выполненная методом плетения фирмой General Electric Aircraft Engines (GEAE)



Рис. 2. Текстильная объемно-армирующая преформа (а) и образец (б) изделия на ее основе (фирма Albany Engineered Composites, США)

Как уже упоминалось выше, 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, специалистов в области изготовления непосредственно ПКМ, проектировщиков и конструкторов изделий.

Потенциал возможностей технического ткачества для производства армирующих структур ПКМ в РФ пока еще мало изучен и недостаточно востребован, и одной из причин этого является утрата многих связей в нашем научном сообществе в 90-е годы. Сложность технологии и необходимость специального оборудования не позволяют пока сделать технологию изготовления тканых объемно-армирующих преформ массовой и легкодоступной. На Западе исследования в области проектирования, изготовления и исследования свойств тканых объемно-армирующих преформ и материалов на их основе ведутся различными фирмами и институтами (рис. 2) [2, 3].

В ходе совместных поисковых экспериментальных работ специалистами ДИТИ НИЯУ МИФИ и ООО НПП «Авиационный текстиль» были разработаны и получены опытные образцы цельнотканых объемно-армирующих преформ для тонкостенных изделий в форме двутавра и труб различного сечения (рис. 3) [4]. В качестве армирующих материалов использовались углеродные, стеклянные и синтетические жгуты или натуральные природные материалы в виде льняных нитей.

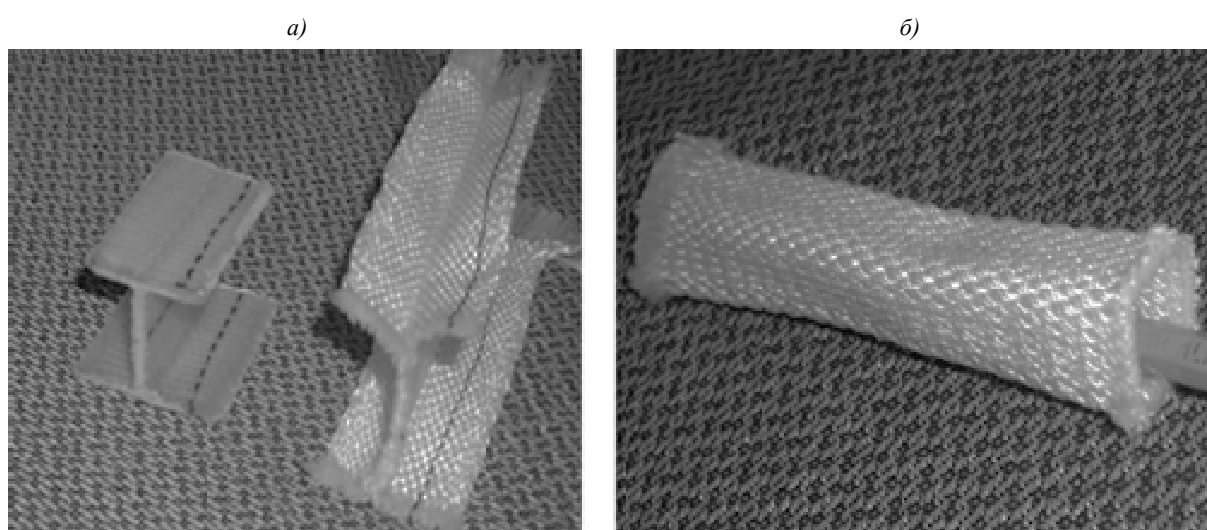


Рис. 3. Цельнотканые объемно-армирующие преформы в виде двутавра (а) и трубы (б)

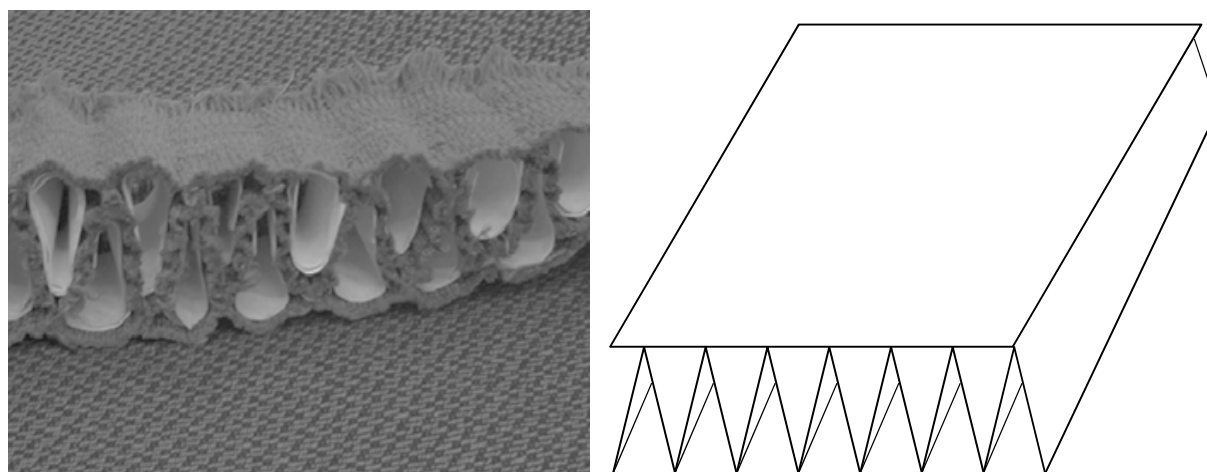


Рис. 4. Цельнотканая объемно-армирующая преформа для пустотелых композитных панелей

Возможным направлением перспективных разработок объемно-армирующих преформ является получение более сложных по структуре объемных, многослойных армирующих материалов и сложнопрофильных преформ на их основе (рис. 4). Такие

преформы имеют единую взаимосвязанную структуру из взаимно переплетенных армирующих нитей. При этом внутренние каналы могут иметь треугольный, прямоугольный либо иной профиль.

Возможно использование текстильных технологий и при получении трехмерных тканей (3D тканей). В этом случае нити расположены в трех направлениях (вдоль ткани, поперек ткани и вертикально) и взаимно переплетены друг с другом в единое целое. Такая цельнотканая армирующая преформа имеет единую взаимосвязанную ортогональную силовую структуру.

В отличие от ткачества, технология изготовления плетеных объемно-армирующих преформ на данный момент освоена такими компаниями, как Herzog (Германия) (рис. 5) и 3TEX Inc. (США) [5, 6]. Опубликована информация об использовании рядом европейских и американских компаний преформ при производстве стрингеров, лонжеронов, шпангоутов, мотогондол, лопастей винтов, шасси, тороидальных резервуаров, компрессорных лопаток, корпусов ракет, велосипедных рам, шасси автомобилей и т. п. (рис. 6).

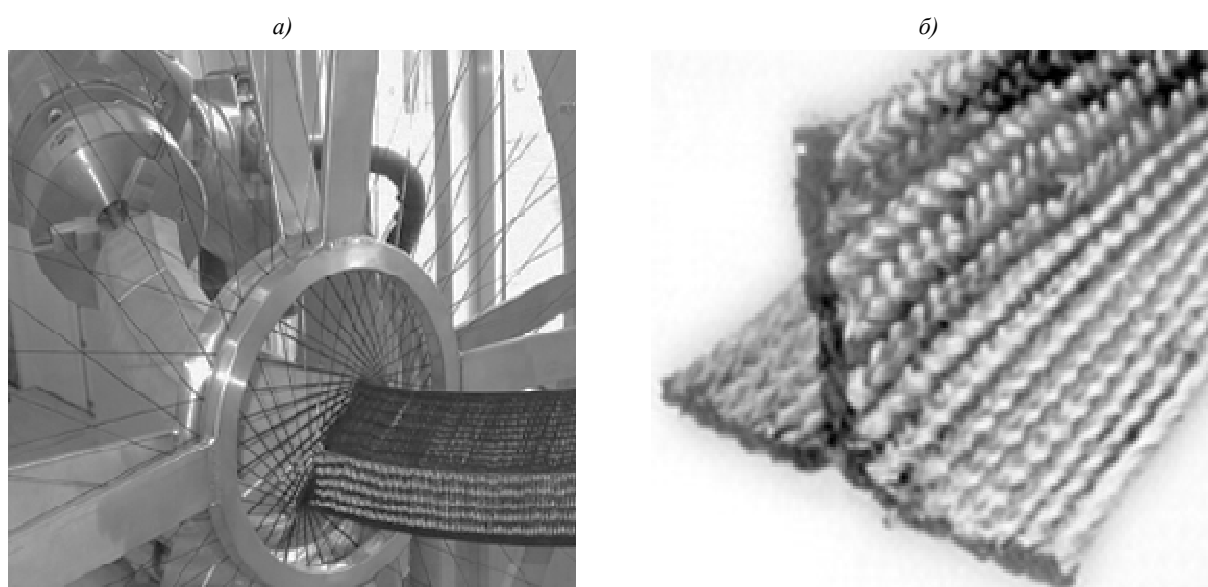


Рис. 5. Изготовление 2,5D объемно-армирующей преформы (а) на оборудовании фирмы Herzog и 3D объемно-армирующая преформа той же фирмы (б)



Рис. 6. Элемент корпуса вентилятора авиадвигателя, произведенный компанией АЕС (совместно с компанией Spesta), изготовленный с применением объемно-армирующих преформ

К сожалению, в отечественном производстве (ввиду отсутствия парка необходимого современного оборудования) широкого развития эти технологии до настоящего времени не получили. В 60–70-х годах прошлого столетия в СССР были разработаны и освоены технологии RTM, в которых использовался сухой текстильный многослойный наполнитель с последующей пропиткой полимерным связующим и дальнейшим отверждением [7]. В последние годы в РФ изготовлен ряд опытных образцов на основе объемно-армирующих преформ, таких как лопатка авиадвигателя, рама иллюминатора, но в серийное производство эти изделия пока так и не поступили [8].

Технология заполнения объемно-армирующих преформ отличается от классических автоклавных способов, и для реализации максимальной эффективности их использования применяют безавтоклавные методы формования, например вакуумную инфузию. Российскими научными институтами, в первую очередь ФГУП «ВИАМ», разработаны и запатентованы различные связующие, использование которых позволяет этими методами изготавливать конструкции с широким спектром эксплуатационных свойств [9]. Так, связующее ВСЭ-21 позволяет изготавливать композитные конструкции с рабочей температурой до 100°C. Связующее имеет жизнеспособность не менее 2 ч, вязкость на уровне 0,2 Па·с. Углепластики, полученные способом инфузии с использованием соответствующих углеродных наполнителей и таких связующих, обладают пористостью  $\leq 3\%$ .

Таким образом, использование в современном наукоемком производстве объемно-армирующих 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 в изготовлении новых образцов техники.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гращенко Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 231–242.
2. McClain M., Goering J. Overview of Recent Developments in 3D Structures /In.: ICCM 17 «3D Textiles & Composites». Edinburgh. 2009. P. 1–12.
3. Mohamed M.H., Bogdanovich A.E. Comparative analysis of different 3D weaving processes, machines and products /In.: ICCM 17 «3D Textiles & Composites». Edinburgh. 2009.
4. Тканая лента сложной геометрической конфигурации для объемных армированных композиционных изделий: пат. 2459894 Рос. Федерация; опубл. 27.08.2012.
5. Automated 3-D Braiding Machine and Method: pat. 6439096 US 2002.
6. Mungalov D., Bogdanovich A. Complex Shape 3-D Braided Composite Preforms: Structural Shapes for Marine and Aerospace //SAMPE Journal. 2004. V. 40 P. 7–20.
7. Душин М.И., Розе А.В., Жигун И.Г. Трехмерно-армированные тканые материалы //Механика полимеров. 1970.
8. Композитная лопатка вентилятора с многослойным армирующим материалом: пат. 2384749 Рос. Федерация; опубл. 20.03.2010. Бюл. №8.
9. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Чурсова Л.В., Коган Д.И. Новые полимерные связующие для перспективных методов изготовления конструкционных волокнистых ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 38–42.

#### REFERENS LIST

1. Grashhenkov D.V., Chursova L.V. Strategija razvitija kompozicionnyh i funkcional'nyh materialov [Strategy of development of composite and functional materials] /V sb.: Aviacionnye materialy i tehnologii: Jubilejnyj nauch.-tehnič. sb. M.: VIAM. 2012. S. 231–242.
2. McClain M., Goering J. Overview of Recent Developments in 3D Structures /In.: ICCM 17 «3D Textiles & Composites» Edinburgh. 2009. P. 1–12.
3. Mohamed M.H., Bogdanovich A.E. Comparative analysis of different 3D weaving processes, machines and products /In.: ICCM 17 «3D Textiles & Composites» Edinburgh. 2009.

4. Tkanaja lenta slozhnoj geometricheskoj konfiguracii dlja ob'emnyh armirovannyh kompozicionnyh izdelij [Woven tape of a difficult geometrical configuration for the volume reinforced composite products]: pat. 2459894 Ros. Federacija; opubl. 27.08.2012.
5. Automated 3-D Braiding Machine and Method: pat. 6439096 US 2002.
6. Mungalov D., Bogdanovich A. Complex Shape 3-D Braided Composite Preforms: Structural Shapes for Marine and Aerospace //SAMPE Journal. 2004. V. 40. P. 7–20.
7. Dushin M.I., Roze A.V., Zhigun I.G. Trehverno-armirovannye tkanye materialy [The three-dimensional reinforced woven materials] //Mehanika polimerov. 1970.
8. Kompozitnaja lopatka ventiljatora s mnogoslojnym armirujushhim materialom [Composite shovel of the fan with a multilayered reinforcing material]: pat. 2384749 Ros. Federacija; opubl. 20.03.2010. Bzul. №8.
9. Muhametov R.R., Ahmadijeva K.R., Chursova L.V., Kogan D.I. Novye polimernye svjazujushhie dlja perspektivnyh metodov izgotovlenija konstrukcionnyh voloknistyh PKM [New polymeric binding for perspective methods of production of constructional fibrous PCM] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №2. S. 38–42.