



УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-5-5

**СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ НА ОСНОВЕ
ПЛЕТЕННЫХ ПРЕФОРМ**

К.И. Донецкий

кандидат технических наук

Д.И. Коган

кандидат технических наук

А.В. Хрульков

Март 2014

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: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-5-5

К.И. Донецкий, Д.И. Коган, А.В. Хрульков

СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ НА ОСНОВЕ ПЛЕТЕННЫХ ПРЕФОРМ

Все чаще в аэрокосмической и гражданской отраслях промышленности при изготовлении изделий из ПКМ используют армирующие плетеные преформы. Такие материалы характеризуются значительным сопротивлением расслаиванию и удару, высокой устойчивостью к усталостным нагрузкам. Использование таких преформ позволяет обеспечить возможность автоматизации производства, высокую скорость и экономичность процесса изготовления ПКМ. Знание их свойств при проектировании образцов техники позволяет оптимизировать выпуск изделий с необходимыми параметрами.

Ключевые слова: *плетеные преформы, полимерные композиционные материалы, безавтоклавные методы формования, угол армирования, прочность.*

K.I. Donetskiy, D.I. Kogan, A.V. Hrulkov

PROPERTIES OF THE POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS MADE ON THE BASIS OF BRAIDED PREFORMS

Even more often in space and civil industries when manufacturing products from polymer composites materials use braided preforms. Such materials are characterized by considerable resistance to stratifying and blow, high fatigue rates. Use braided preforms allows to provide possibility of automation of production, to provide the high speed and profitability of process of manufacturing of polymer composites materials. The knowledge of their properties at design of samples of equipment allows to optimize release of products with necessary parameters.

Key words: *braided preforms, polymer composites materials, non-autoclave molding methods, angle reinforcement, strength.*

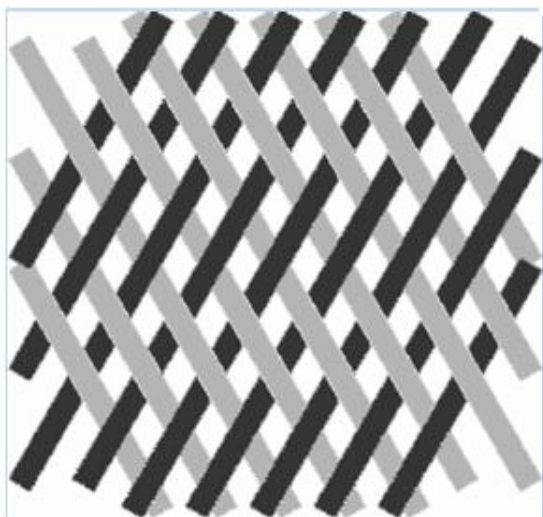
В настоящее время современная промышленность освоила значительное количество новых методов производства композиционных материалов [1–3]. Среди них – и способ изготовления ПКМ на основе плетеных преформ, который является конкурентоспособной альтернативой такому уже давно используемому технологическому про-

цессу, как намотка. Возможность получения материалов с точным соответствием производимого изделия заданной внешней форме, их устойчивостью к деформационным разнонаправленным нагрузкам, изотропностью или наоборот, при необходимости, градиентностью свойств, снижением массы конструкций при сохранении высоких эксплуатационных свойств [4–6], сокращением трудоемкости технологических процессов, их автоматизации и роботизации – все это является серьезными достоинствами этого процесса. Кроме того, характерными особенностями изготовления ПКМ с применением плетеных преформ являются возможность вплетения закладных элементов, возможность оплетки оправок сложной формы, применение при изготовлении изделий современных, экономически эффективных технологий пропитки [7].

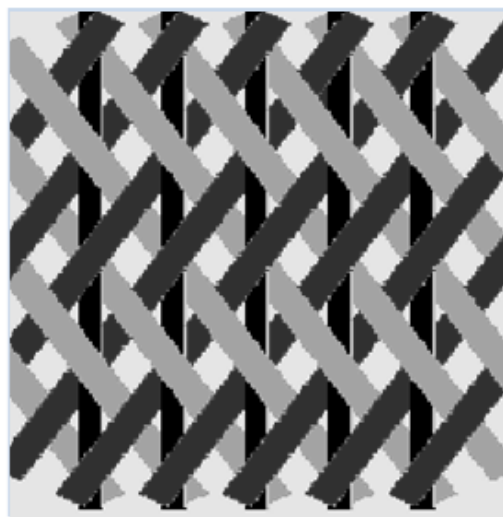
Современные технологии плетения позволяют изготавливать преформы как в виде «мягкого рукава», так и ткани или многослойной оплетки оправки, при необходимости и переменного диаметра. Использование в качестве материала для изготовления преформ практически любого волокна, такого как углеродное, стеклянное, базальтовое или волокно природного происхождения (например льняное), позволяет конструкторам проектировать изделия с широким спектром свойств и в широком ценовом диапазоне [8].

Использование стандартных технологий при изготовлении конструкций сложного профиля является непростой задачей по причине сложности раскроя заготовок препрегов (в случае применения препреговой технологии) и необходимости применения ручной выкладки в зонах сложных переходов. Использование же текстильных преформ (в данной статье в первую очередь пойдет речь о преформах, выполненных методом плетения), которые характеризуются высокой подвижностью нитей и способны создавать криволинейные поверхности сложной формы (см. рисунок), позволяет решать эту задачу значительно проще, обеспечивая возможность автоматизации процесса [9]. Для изготовления изделий на основе таких преформ чаще всего используются уже ставшие привычными безавтоклавные способы формования, такие как вакуумная инфузия и пропитка под давлением [10, 11].

Несмотря на видимые преимущества отечественные технологии безавтоклавного изготовления ПКМ с применением плетеных преформ в настоящее время не получили развития. Ряд попыток освоения этой технологии в последние годы привел к изготовлению лишь нескольких опытных образцов, таких как лопатка авиадвигателя, рама иллюминатора и других, но развития технология не получила ввиду отсутствия как своей завершенности, так и современного оборудования для серийного производства изделий [12].



Биаксиальное плетение



Триаксиальное плетение

Схемы армирования плетеных преформ

Существуют две основные схемы армирования, применяемые при изготовлении плетеных преформ, – биаксиальная и триаксиальная (см. рисунок). В первом случае используются только две нити, чаще всего переплетаемые под углами от 30 до 60 град. Во втором случае добавляется третья нить, располагающаяся под нулевым углом. Введение этой нити в схему армирования значительно изменяет физико-механические свойства уже готового композиционного материала, что будет показано далее.

Современное оборудование для плетения [13] позволяет производить плетеные преформы (как рукава, так и ткани) самых разных размеров и схем плетения с высокой производительностью – например, на плетельных установках производства фирмы Herzog (Германия) возможно изготовление материалов с различными параметрами (табл. 1).

Таблица 1

Свойства плетеных преформ, производимых на оборудовании фирмы Herzog (Германия)

Вид преформ	Размер	Укладка волокна	Материал
Однослойная в виде рукава	Длина – любая, диаметр – от 30 до 4000 мм	От ± 30 до ± 60 град, возможность укладки нити в «нулевом» направлении	Угле-, стекло-, органо- и натуральные волокна
Однослойная в виде ткани	Длина – любая, ширина – до 1600 мм		
Объемная (многослойная)	Длина – любая, диаметр – от 30 до 4000 мм		

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, корпусов вентилятора авиадвигателя.

Такие преформы получили коммерческое распространение и производители приводят информацию по материалам, выполненным на основе этих преформ. Например компания A&P Technology [14], известная своими работами в области изготовления и внедрения плетеных преформ в авиационной и космической промышленности (с ее участием успешно изготовлены и внедрены в производство лопадки авиадвигателя, шпангоуты и многое другое), публикует следующие данные по свойствам материалов (табл. 2).

Таблица 2

Свойства материалов на основе плетеных преформ [14]

Тип образца	Предел прочности при растяжении, МПа		Модуль упругости при растяжении, ГПа	
	при направлении выкладки, град			
	[0]	[90]	[0]	[90]
Плетеная биаксиальная ткань	365	365	–	–
Плетеная триаксиальная ткань	800	800	47	44

Видно, что в случае использования триаксиального плетения механическая прочность материала заметно повышается.

В работе той же фирмы на примере углепластика на основе волокна AS4 и эпоксидной смолы EPON9504 (табл. 3) показано, что увеличение угла плетения приводит к снижению прочности и модуля упругости при растяжении углепластика.

Таблица 3

Влияние угла плетения на свойства углепластика AS4/EPON9504 (данные A&P Technology (США))

Угол плетения, град	Предел прочности при растяжении, МПа	Модуль упругости при растяжении, ГПа
25	660	54
30	442	38
45	178	16

Исследование влияния различных эпоксидных связующих на механические свойства материала при использовании триаксиальных структур показано в работе [15]. Образцы ПКМ, выполненные методом RTM, на основе углеволокна TORAYCA T700S с углом армирования ± 60 град и различных связующих показали следующие механические свойства (табл. 4).

Видно, что выбор связующего оказывает значительное влияние на свойства материала. Отметим также, что авторы [15] при изготовлении образцов плетеных преформ использовали разный номинал углеволокна: в направлении армирования $[0^\circ]$ – волокна 24К, в направлении армирования $[\pm 60^\circ]$ – 12К.

Таблица 4

**Влияние связующего на механические свойства ПКМ,
выполненных на основе триаксиальных преформ**

Предел прочности при осевом растяжении, МПа			Предел прочности при поперечном растяжении, МПа		
Связующее EPIKOTE Resin 862	Связующее CYCOM PR 520	Связующее Hexcel 3502	Связующее EPIKOTE Resin 862	Связующее CYCOM PR 520	Связующее Hexcel 3502
810	970	780	460	550	330

В работе [16] представлены механические свойства образцов, изготовленных с использованием преформ на основе углеродного наполнителя Т-700 и эпоксидных связующих 5208 и М36, соответственно – Т700/5208 и Т700/М36. Видно, что с увеличением угла плетения уменьшаются прочность и модуль упругости при растяжении и сжатии при приложении нагрузки в направлении $[0^\circ]$, в то же время при приложении нагрузки в направлении $[90^\circ]$ наблюдается увеличение прочности и модуля при растяжении и сжатии (табл. 5).

Таблица 5

**Влияние угла плетения и марки связующего на свойства углепластика
на основе волокна Т-700 и эпоксидных связующих Hexcel М36 и Cytec 5206**

Связующее (угол плетения)	Предел прочности при растяжении, МПа	Модуль упругости при растяжении, ГПа	Предел прочности при сжатии, МПа	Модуль упругости при сжатии, ГПа
Направление приложения нагрузки $[0^\circ]$				
М36 (± 45 град)	895	68	591	61
М36 (± 60 град)	805	47	507	45
5208 (± 60 град)	–	–	–	49
Направление приложения нагрузки $[90^\circ]$				
М36 (± 45 град)	194	18	265	18
М36 (± 60 град)	456	44	422	46
5208 (± 60 град)	–	–	229	41

Необходимо отметить также значительную устойчивость к ударным нагрузкам ПКМ на основе плетеных преформ [17]. В табл. 6 представлено влияние метода изготовления преформы на сохранение прочности при сжатии после удара образцов углепластика. Сравнивались образцы, изготовленные из однонаправленной ленты (схема армирования $[0^\circ/90^\circ]$), ткани саржевого переплетения (схема армирования $[0^\circ/90^\circ]$), плетеной преформы (угол плетения 45 град). Видно, что образец, изготовленный с применением плетеной преформы, как и ожидалось, имеет максимальное сохранение прочности после удара.

**Сопоставление прочности при сжатии после удара образцов ПКМ,
изготовленных разными способами**

Тип образца	Сила удара, Дж	Сохранение прочности, %
Углепластик на основе однонаправленной ленты (12К, 800 текс, 100 г/м ²) при схеме армирования [0°/90°]	25	65
Углепластик на основе ткани саржевого переплетения (3К, 200 текс, 200 г/м ²) при схеме армирования [0°/90°]	25	71
Углепластик на основе полотна биаксиального плетения (12К, 800 текс, угол плетения 45 град)	25	80

Угол армирования плетеной преформы напрямую влияет на будущие свойства ПКМ, изготовленного на основе этого материала. Варьируя его, 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 модуль упругости при растяжении и сжатии при приложении нагрузки в направлении [0°], в то же время при приложении нагрузки в направлении [90°] наблюдается увеличение прочности и модуля упругости при растяжении и сжатии. Это позволяет изготавливать преформу, схема армирования которой оптимально адаптирована к виду нагрузки будущей конструкции. При этом необходимо подчеркнуть и то, что образец, изготовленный с применением плетеной преформы, имеет максимальное сохранение прочности после удара в отличие от материалов, изготовленных по традиционным технологиям.

Таким образом, представляется несомненно важным знание закономерностей процесса изготовления ПКМ на основе армирующих плетеных преформ с целью получения материала именно с теми свойствами, которые от него ожидаются. Реализация всех достоинств этого метода также напрямую связана с пониманием особенностей как самого изготовления преформы, выбором конкретного связующего, так и способом формования самого изделия для его практического использования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гращенко Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 231–242.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.

3. Тимошков П.Н., Коган Д.И. Современные технологии производства полимерных композиционных материалов нового поколения //Труды ВИАМ. 2013. №4 (viam-works.ru).
4. Roberts G.D., Pereira J.M., Revilock D.M., Binienda W.K., Xie Ming, Braley M. Ballistic Impact of Braided Composites With a Soft Projectile //J. Aerospace Eng. 2005. V. 18. №1. P. 3–7.
5. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Деев И.С., Никишин Е.Ф. Свойства полимерных композиционных материалов после воздействия открытого космоса на околоземных орбитах [Properties of polymeric composite materials after exposure to open space in earth orbit] //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №10. С. 2–3.
6. 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.
7. McClain M., Goering J. Overview of Recent Developments in 3D Structures //ICCM 17, 3D Textiles & Composites. Edinburgh. 2009.
8. Geoff Wood. Quasi-isotropic braid reduces cost in large composite tooling //JEC composites magazine. 2009. V. 53. №11–12. P. 46–47.
9. 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).
10. Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р., Чурсова Л.В. Особенности изготовления изделий из ПКМ методом пропитки под давлением [Features manufacture of RMB by pressure impregnation] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 18–26.
11. 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.
12. Композитная лопатка вентилятора с многослойным армирующим материалом: пат. 2384749 Рос. Федерация. опубл. 20.03.2010. Бюл. №8.
13. Лаврис Е.В. Совершенствование плетельного оборудования для производства текстильных деталей сложных форм //Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2011. №70.
14. Интернет ресурс www.braider.com.

15. Kohlman L.W., Bail J.L., Roberts G.D., Salem J.A., Martin R.E., Binienda W.K. A notched coupon approach for tensile testing of braided composites /In: NASA Publications. 2012. №65. P. 1–9.
16. Robert G.D., Goldberg R.K., Binienda W.K., Arnol W.A., Littell J.D., Kohlman L.W. 65-th Annual Forum and Technology Display sponsored by the American Helicopter Society. Grapevine. 2009. P. 1–41.
17. 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.

REFERENCES LIST

1. Grashhenkov D.V., Chursova L.V. Strategija razvitija kompozicionnyh i funkcional'nyh materialov [Development Strategy composite and functional materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 231–242.
2. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
3. Timoshkov P.N., Kogan D.I. Sovremennye tehnologii proizvodstva polimernyh kompozicionnyh materialov novogo pokolenija [Modern technologies of polymeric composite materials of new generation] //Trudy VIAM. 2013. №4 (viam-works.ru).
4. Roberts G.D., Pereira J.M., Revilock D.M., Binienda W.K., Xie Ming, Braley M. Ballistic Impact of Braided Composites With a Soft Projectile //J. Aerospace Eng. 2005. V. 18. №1. R. 3–7.
5. Kablov E.N., Starcev O.V., Deev I.S., Nikishin E.F. Svoystva polimernyh kompozicionnyh materialov posle vozdejstvija otkrytogo kosmosa na okolozemnyh orbitah [Properties of polymeric composite materials after exposure to open space in earth orbit] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravochnik. 2012. №10. S. 2–3.
6. 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 of space-reinforcing preforms during the production of PCM] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №1. S. 35–39.
7. McClain M., Goering J. Overview of Recent Developments in 3D Structures //ICCM 17, 3D Textiles & Composites. Edinburgh. 2009.

8. Geoff Wood. Quasi-isotropic braid reduces cost in large composite tooling //JEC composites magazine. 2009. V. 53. №11–12. P. 46–47.
9. Doneckij K.I., Kogan D.I., Hrul'kov A.V. Ispol'zovanie tehnologij pletenija pri proizvodstve jelementov konstrukcij iz PKM [The use of technology in the production of weaving elements of designs from RMB] //Trudy VIAM. 2013. №10. St. 04 (viam-works.ru).
10. Dushin M.I., Hrul'kov A.V., Muhametov R.R., Chursova L.V. Osobennosti izgotovlenija izdelij iz PKM metodom propitki pod davleniem [Features manufacture of RMB by pressure impregnation] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 18–26.
11. Muhametov R.R., Ahmadijeva K.R., Chursova L.V., Kogan D.I. Novye polimernye svjazujushhie dlja perspektivnyh metodov izgotovlenija konstrukcionnyh voloknistyh PKM [New polymeric binders for advanced manufacturing techniques of structural fibrous RMB] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №2. S. 38–42.
12. Kompozitnaja lopatka ventiljatora s mnogoslojnym armirujushhim materialom [Composite fan blade with multilayer reinforcing material]: pat. 2384749 Ros. Federacija. opubl. 20.03.2010. Bjul. №8.
13. Lavris E.V. Sovershenstvovanie pletel'nogo oborudovanija dlja proizvodstva tekstil'nyh detalej slozhnyh form [Improving braiding equipment for production of textile complex parts] //Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2011. №70.
14. Internet resurs www.braider.com.
15. Kohlman L.W., Bail J.L., Roberts G.D., Salem J.A., Martin R.E., Binienda W.K. A notched coupon approach for tensile testing of braided composites /In: NASA Publications. 2012. №65. P. 1–9.
16. Robert G.D., Goldberg R.K., Binienda W.K., Arnol W.A., Littell J.D., Kohlman L.W. 65-th Annual Forum and Technology Display sponsored by the American Helicopter Society. Grapevine. 2009. P. 1–41.
17. 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.