



УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-5-5

**ПРИМЕНЕНИЕ ПЛЕТЕННЫХ ПРЕФОРМ
ДЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
В ГРАЖДАНСКИХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
(обзор)**

Ф.С. Власенко

кандидат технических наук

А.Е. Раскутин

кандидат технических наук

К.И. Донецкий

кандидат технических наук

Январь 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: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-5-5

Ф.С. Власенко¹, А.Е. Раскутин¹, К.И. Донецкий¹

ПРИМЕНЕНИЕ ПЛЕТЕННЫХ ПРЕФОРМ ДЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ГРАЖДАНСКИХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ (обзор)

Рассмотрены примеры применения плетеных преформ для изготовления полимерных композиционных материалов (ПКМ) и изделий из них в различных отраслях экономики, таких как строительство, машиностроение, спорт и отдых, аэрокосмическая промышленность. Рассмотрены преимущества ПКМ на основе плетеных преформ в сравнении с композиционными материалами, изготавливаемыми по альтернативным технологиям, и с традиционно применяемыми материалами.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, объемно-армирующие преформы, плетеные преформы для ПКМ, плетеные преформы в строительстве и автомобилестроении.

F.S. Vlasenko, A.E. Raskutin, K.I. Donetskiy

APPLICATION OF BRAIDED PREFORMS FOR POLYMER COMPOSITE MATERIALS IN CIVIL INDUSTRIES (review)

The article considers examples of braided preforms application for PCM in various branches of economy, such as construction, machine building, sports and leisure, aerospace industry. Considered the advantages of PCM based on braided preforms as compared to composite materials produced by alternative technologies and traditionally used materials.

Keywords: polymer composite materials, 3D preforms, braided preforms for PCM, braided preforms in construction and automotive industry.

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

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) являются важной и неотъемлемой частью современной науки и техники. Активное применение ПКМ началось с авиационной и космической техники, и в настоящее время аэрокосмическая отрасль и связанные с ней научно-исследовательские институты вносят значительный вклад в разработку новых материалов и технологий. В ВИАМ разработаны «Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года», институт является координатором сформированной в 2010 году технологической платформы «Полимерные композиционные материалы и технологии» и принимает активное участие в развитии композитной отрасли [1–3].

Среди различных классов ПКМ, отличающихся составом и свойствами полимерных матриц и наполнителей, особого внимания заслуживают непрерывно армированные ПКМ. Такие материалы способны обеспечить максимальную реализацию прочностных характеристик при создании уникальных изделий и конструкций нового поколения применительно к ответственным сооружениям и сложным техническим системам. Общемировые тенденции применения экономически эффективных и экологически безопасных технологий способствовали развитию безавтоклавных методов изготовления ПКМ, таких как RTM, RFI, вакуумная инфузия [4–11]. Наиболее эффективно применение данных методов при использовании объемно-армирующих преформ из непрерывного армирующего наполнителя.

Одним из способов изготовления объемно-армирующих преформ является процесс плетения. Процесс изготовления ПКМ на основе плетеных преформ является конкурентоспособной альтернативой таким технологическим процессам, как намотка, автоматическая и ручная выкладка [12, 13]. Возможность вплетать закладные элементы, оплетать отверстия и оправки сложной геометрической формы, применять при изготовлении изделий современные экономически эффективные технологии – RTM, VARTM, а также высокая скорость и экономичность процесса плетения позволяют применять этот процесс при изготовлении изделий из ПКМ в различных отраслях промышленности [14]. Основными отраслями применения плетеных преформ (помимо аэрокосмической) являются машиностроение, строительство, производство товаров для спорта и отдыха и изделий медицинского назначения.

Одним из примеров применения плетеных преформ в строительной индустрии является их использование для изготовления арочных элементов быстровозводимых мостов [15]. Арочный элемент представляет собой полую трубу заданного радиуса кривизны и диаметра, стенки которой выполнены из углепластика, стеклопластика или ги-

бридного материала. Арочный элемент изготавливают вакуумной пропиткой плетеной преформы на извлекаемой оправке [16, 17]. Применение связующих холодного отверждения позволяет проводить процесс непосредственно на месте возведения моста. Изготовленный арочный элемент устанавливают на подготовленное основание и заполняют бетоном через технологические отверстия, таким образом он является несъемной опалубкой и системой внешнего армирования. Получаемые бетонокомпозитные арочные элементы являются основными несущими элементами быстровозводимого моста. С применением данной технологии, разработанной в Университете штата Мэн и компанией Advanced Infrastructure Technologies (AIT) при поддержке департамента транспорта штата Мэн, возведен ряд объектов в США и Канаде [17, 18]. Применение плетеных преформ для изготовления арочных элементов быстровозводимых мостов позволяет:

- значительно упростить и снизить стоимость транспортировки материалов на место возведения моста (возможно изготовление арочного элемента непосредственно на стройплощадке);
- упростить и ускорить процесс возведения моста;
- уменьшить применение тяжелой строительной техники;
- значительно увеличить межремонтные сроки и сократить расходы на содержание объекта.

В работе [19] описана возможность изготовления многофункциональных армирующих элементов для бетонных конструкций на основе плетеных преформ. Армирующие элементы помимо основной функции армирования бетона осуществляют также мониторинг напряженно-деформированного состояния бетонных элементов. Углеродное волокно используется как сенсорный и армирующий элемент совместно со стеклянным волокном. Для испытаний изготавливали армирующие элементы с различным соотношением углеродных и стеклянных волокон. Полученные зависимости изменения электрического сопротивления от деформации показали пригодность использования армирующих элементов в качестве сенсоров напряженно-деформированного состояния.

Такие преимущества, как возможность вплетения закладных элементов и изготовления тонкостенных профилей (толщина – до 0,2 мм), а также профилей сложной геометрической формы, делают перспективным применение плетеных преформ для изготовления профилей различной геометрии строительного назначения, поскольку позволяют облегчить монтаж профилей и снизить массу конструкций, сделать механическое соединение профилей более эффективным.

В машиностроении, в том числе и автомобилестроении, плетеные преформы применяют для изготовления деталей сложной геометрической формы. Так, компания Roding Automobile GmbH и Мюнхенский университет разработали технологию изготовления углепластиковой рамы ветрового стекла для легкового автомобиля на основе плетеной преформы [20]. В работе описан способ изготовления рамы ветрового стекла – трехмерного изогнутого полого профиля. Формообразующая оснастка, изготовленная из полиуретановой пены марки Baydur 67-160, протягивается с помощью роботизированной оснастки через рабочую зону машины для плетения, формируя преформу. Для изготовления преформы применяется триаксиальное плетение и дополнительный однонаправленный армирующий слой в нижней части. Рама изготавливается из полученной преформы методом RTM. Технологическая сложность изготовления преформы для рамы ветрового стекла связана с тем, что деталь имеет вогнутый профиль. Вопрос технологии изготовления плетеных преформ с вогнутым профилем недостаточно изучен и отработан в отличие от технологий оплетения выпуклых оснасток и изготовления соответствующих преформ. Авторами предложено следующее технологическое решение: перед оплетением в вогнутую часть профиля формообразующей оснастки укладываются гибкие надувные трубки специально рассчитанных формы и размера, преобразуя вогнутый профиль в выпуклый и обеспечивая тем самым равномерную укладку волокон под заданным углом. Перед процессом пропитки надувные трубки извлекают и волокна преформы адаптируются к вогнутой форме оправки.

Плетеные преформы для ПКМ также использованы при создании сверхлегкого колесного диска для автомобилей, образец которого был представлен в 2011 году компаниями NRG и Huntsman на выставке JEC Composite [21]. Для изготовления диска использовали ступицу из алюминиймагниевого сплава, титановые гильзы и крепежные элементы, а также обод из углепластика, полученный по инфузионной технологии с применением связующего марки Araldite. Данный диск позволяет сократить расход топлива на 3–8%, а также добиться очень низкой массы и момента инерции колеса – на 40% ниже, чем у наиболее легких дисков из алюминиевых или магниевых сплавов.

Другим направлением применения плетеных преформ в машиностроении является изготовление элементов, поглощающих энергию удара. В работе [22] рассмотрены трубы, изготовленные пултрузией на основе плетеных преформ. Такой способ производства позволяет существенно сократить стоимость изделий, сохраняя при этом высокое качество продукции. Полученные в работе данные продемонстрировали высокую способность плетеных композитных труб поглощать значительное количество энергии при

сжатии, которое зависит от угла плетения. В работе [23] описана возможность применения трубчатых структур из композиционных материалов на основе плетеных преформ для повышения пассивной безопасности транспортных средств. Рассмотрена модель разрушения композиционных материалов на основе плетеных преформ. Показана адекватность модели для предсказания механизма разрушения и количества поглощенной энергии для композитных труб при осевом сжатии. Показано, что композиционные материалы на основе плетеных преформ имеют лучшие характеристики по поглощению энергии, чем традиционные металлы. В работе [24] описано влияние применения эластичной смолы и угла плетения преформы на поглощение энергии композиционным материалом, показано увеличение поглощения энергии при использовании более эластичной смолы и угла плетения 30 град.

Изготовление элементов рам и силовых каркасов из ПКМ на основе плетеных преформ позволяет уменьшить материалоемкость на ~30% по сравнению с применением тканых преформ. Кроме того, элементы, выполненные из ПКМ на основе плетеных преформ, обладают высокой весовой эффективностью и сохраняют прочность после удара. В таблице представлены данные по сохранению прочности при сжатии после удара образцами углепластика, изготовленными по технологии VARI с применением различных типов преформ [25].

Сохранение прочности при сжатии после удара силой 25 Дж образцами, изготовленными методом VARI (матрица – эпоксидное связующее марки LY556)

Тип образца углепластика	Сохранение прочности (DIN EN 6038), %
На основе однонаправленной ленты (12К, 800 текс, плотность 100 г/м ²) с укладкой [0°/90°]	65
На основе ткани саржевого переплетения (3К, 200 текс, плотность 200 г/м ²) с укладкой [0°/90°]	71
На основе биаксиального плетеного полотна (12К, 800 текс, угол плетения 45 град)	80

В аэрокосмической отрасли плетеные преформы используют для изготовления шпангоутов фюзеляжа, валов, защитных кожухов авиационных двигателей, стоек вертолетных шасси, статорных лопаток, пропеллеров, закрылков [26, 27]. В работе [26] описан способ изготовления шпангоута фюзеляжа методом оплетения оправки, имеющей форму колеса с изменяемым радиусом кривизны. В работе [27] описано применение плетеной преформы для изготовления защитного кожуха вентилятора авиадвигателя. Тесты на плоских панелях показали, что композитная панель имеет меньшие повреждения по сравнению с алюминиевой после попадания имитатора лопатки турбины.

Процесс изготовления плетеной объемно-армирующей преформы также может быть использован при дополнительном усилении и изготовлении баллонов высокого

давления. По данным компании A&P Technology применение плетеных преформ при изготовлении баллонов высокого давления приводит к повышению их баллистической стойкости, увеличению разрушающего давления, снижению стоимости (процесс изготовления баллона более производительный по сравнению с традиционной технологией намотки). Применение плетения для дополнительного усиления баллонов высокого давления позволяет уменьшить материалоемкость, а значит снизить стоимость и уменьшить массу усиленного баллона по сравнению с традиционно применяемой технологией намотки [13].

Преимуществами применения плетеных преформ при изготовлении товаров для спорта и отдыха являются снижение массы, повышение прочности и устойчивости к повреждениям, уменьшение толщины профилей, эстетически привлекательный внешний вид, снижение производственных издержек благодаря высокой автоматизации производственного процесса. Примерами может служить изготовленная из углепластика на основе плетеной преформы велосипедная рама, представленная Мюнхенским университетом (Германия) и Институтом углекомполитов (Германия) [28], и хоккейная клюшка, выполненная с применением плетеных преформ компании A&P Technology [13].

Применение плетеных преформ для изготовления ПКМ позволяет реализовать ряд преимуществ, среди которых:

- экономически эффективные технологии изготовления изделий – RTM, VARTM;
- высокопроизводительный процесс изготовления преформ – скорость изготовления в разы выше скорости изготовления объемно-армирующей преформы 3D ткачеством;
- снижение материалоемкости;
- высокая способность к поглощению энергии удара;
- высокая стойкость к повреждениям;
- высокое сопротивление кручению;
- возможность вплетения закладных элементов и оплетения отверстий.

Однако при выборе способа изготовления объемно-армирующей преформы необходимо учитывать и недостатки плетеных преформ, к которым можно отнести риск изменения угла плетения при транспортировке преформы и съеме ее с оправки, технологические сложности оплетения вогнутых поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.

2. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
3. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
4. 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.
5. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Ивахненко Ю.А., Балинова Ю.А. Перспективные армирующие высокотемпературные волокна для металлических и керамических композиционных материалов //Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 05 (viam-works.ru).
6. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Юрков Г.Ю. Перспективы использования углеродсодержащих наночастиц в связующих для полимерных композиционных материалов //Российские нанотехнологии. 2013. Т. 8. №3–4. С. 24–42.
7. Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р., Чурсова Л.В. Особенности изготовления изделий из ПКМ методом пропитки под давлением //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 18–26.
8. Low-Toxicity, high-temperature polyimides: pat. 99/36462 WO; publ. 22.07.1999.
9. Composition of and method for making high performance resins for infusion and transfer molding processes: pat. 6359107 US; publ. 19.03.2002.
10. Постнова М.В., Постнов В.И. Опыт развития безавтоклавных методов формования ПКМ //Труды ВИАМ. 2014. №4. Ст. 06 (viam-works.ru).
11. Борщев А.В., Хрульков А.В., Халтурина Д.С. Изготовление низкопористого полимерного композиционного материала для применения в слабо- и средненагруженных конструкциях //Труды ВИАМ. 2014. №7. Ст. 03 (viam-works.ru).
12. Донецкий К.И., Хрульков А.В., Коган Д.И. и др. Применение объемно-армирующих преформ при изготовлении изделий из ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 35–39.
13. Интернет ресурс www.braider.com.
14. Перепелкин К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. СПб.: Научные основы технологии. 2009. 380 с.
15. Rapidly deployable lightweight load resisting arch system: pat. 2006/0174549A1 US; publ. 10.08.2006.
16. Composite construction members and method of making: pat. 2011/0012282A1 US; publ. 20.01.2011.

17. Интернет ресурс <http://www.maine.gov/mdot/tr/bridgebackpack.htm>.
18. Интернет ресурс <http://www.aitbridges.com/compositebridgesystem>.
19. Zdraveva E., Gonilho-Pereira C., Lanceros-Mendez S. et al. Braided composite rods for civil construction applications //Advanced Materials Research. 2010. V. 123–125. P. 149–152.
20. Kollmannsberger A., Brand M., Drechsler K. Braiding a convertible windscreen frame with concave sections //JEC Composite Magazine. 2012. №74. P. 24–25.
21. Carbon/magnesium wheels for high-performance vehicles //JEC Composite Magazine. 2012. №71. P. 36–37.
22. Inai R., Chirwa E.C., Saito H., Uozumi T., Nakai A., Hamada H. Experimental investigation on the crushing properties of carbon fibre braided composite tubes //International Journal of Crashworthiness. 2003. V. 8. №5. P. 513–521.
23. Huawu Liu, Yongxin Yang, Shijie Shen et al. Crash Energy Absorption of Braided Composite Tubes and its Application in Vehicle Passive Safety //Advanced Materials Research. 2012. V. 627. P. 659–671.
24. 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.
25. Erber A., Birkefeld K., Drechsler K. The influence of braiding configuration on damage tolerance of drive shafts /SAMPE EUROPE 30-th international Jubilee Conference and Forum. Paris. 2010. P. 364–371.
26. Braided reinforcement for aircraft fuselage frames and method of producing the same: pat. 8210086B2 US; publ. 03.07.2012.
27. Griffiths B. Composite fan blade containment case //High-performance Composites. 2005. №5. P. 76–78.
28. JEC Innovation Awards Program 2012: Innovation awards winners //JEC Composite Magazine. 2012. №71. P. 51.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and processing technologies for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
2. Kablov E.N. Aviakosmicheskoe materialovedenie [Aerospace materials] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocnik. 2008. №3. S. 2–14.

3. Kablov E.N. Himija v aviacionnom materialovedenii [Chemistry aviation materials] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2010. T. LIV. №1. S. 3–4.
4. 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 methods of structural fiber PKM] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №2. S. 38–42.
5. Kablov E.N., Shhetanov B.V., Ivahnenko Ju.A., Balinova Ju.A. Perspektivnye armirujushhie vysokotemperaturnye volokna dlja metallicheskih i keramicheskikh kompozicionnyh materialov [Prospective reinforcing fibers for high temperature ceramic composites and metal materials] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 05 (viam-works.ru).
6. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Jurkov G.Ju. Perspektivy ispol'zovanija uglerod-soderzhashhijh nanochastic v svjazujushhijh dlja polimernyh kompozicionnyh materialov [Prospects for the use of carbonaceous nanoparticles in binders for polymer composites] //Rossijskie nanotehnologii. 2013. T. 8. №3–4. S. 24–42.
7. Dushin M.I., Hrul'kov A.V., Muhametov R.R., Chursova L.V. Osobennosti izgotovlenija izdelij iz PKM metodom propitki pod davleniem [Especially the manufacture of PCM by pressure impregnation] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. C. 18–26.
8. Low-Toxicity, high-temperature polyimides: pat. 99/36462 WO; pabl. 22.07.1999.
9. Composition of and method for making high performance resins for infusion and transfer molding processes: pat. 6359107 US; pabl. 19.03.2002.
10. Postnova M.V., Postnov V.I. Opyt razvitija bezavtoklavnyh metodov formovanija PKM [Experience in the development of methods of forming RMB bezavtoklavnogo] //Trudy VIAM. 2014. №4. St. 06 (viam-works.ru).
11. Borshhev A.V., Hrul'kov A.V., Halturina D.S. Izgotovlenie nizkoporistogo polimernogo kompozicionnogo materiala dlja primenenija v slabo- i srednenagruzhennyh konstrukcijah [Production of low porosity of the polymer composite material for use in low- and moderate constructions] //Trudy VIAM. 2014. №7. St. 03 (viam-works.ru).
12. Doneckij K.I., Hrul'kov A.V., Kogan D.I. i dr. Primenenie ob'emno-armirujushhijh preform pri izgotovlenii izdelij iz PKM [Use volumetric reinforcing preforms in the manufacture of PCM articles] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №1. S. 35–39.
13. Internet resurs www.braider.com.
14. Perepelkin K.E. Armirujushhie volokna i voloknistye polimernye kompozity [Reinforcing fibers and fibrous polymer composites]. SPb.: Nauchnye osnovy tehnologii. 2009. 380 s.

15. Rapidly deployable lightweight load resisting arch system: pat. 2006/0174549A1 US; pabl. 10.08.2006.
16. Composite construction members and method of making: pat. 2011/0012282A1 US; pabl. 20.01.2011.
17. Internet resurs <http://www.maine.gov/mdot/tr/bridgebackpack.htm>.
18. Internet resurs <http://www.aitbridges.com/compositebridgesystem>.
19. Zdraveva E., Gonilho-Pereira C., Lanceros-Mendez S. et al. Braided composite rods for civil construction applications //Advanced Materials Research. 2010. V. 123–125. P. 149–152.
20. Kollmannsberger A., Brand M., Drechsler K. Braiding a convertible windscreen frame with concave sections //JEC Composite Magazine. 2012. №74. P. 24–25.
21. Carbon/magnesium wheels for high-performance vehicles //JEC Composite Magazine. 2012. №71. P. 36–37.
22. Inai R., Chirwa E.C., Saito H., Uozumi T., Nakai A., Hamada H. Experimental investigation on the crushing properties of carbon fibre braided composite tubes //International Journal of Crashworthiness. 2003. V. 8. №5. P. 513–521.
23. Huawu Liu, Yongxin Yang, Shijie Shen et al. Crash Energy Absorption of Braided Composite Tubes and its Application in Vehicle Passive Safety //Advanced Materials Research. 2012. V. 627. P. 659–671.
24. 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.
25. Erber A., Birkefeld K., Drechsler K. The influence of braiding configuration on damage tolerance of drive shafts /SAMPE EUROPE 30-th international Jubilee Conference and Forum. Paris. 2010. P. 364–371.
26. Braided reinforcement for aircraft fuselage frames and method of producing the same: pat. 8210086B2 US; pabl. 03.07.2012.
27. Griffiths B. Composite fan blade containment case //High-performance Composites. 2005. №5. P. 76–78.
28. JEC Innovation Awards Program 2012: Innovation awards winners //JEC Composite Magazine. 2012. №71. P. 51.