

УДК 678.747.2:678.067.5

К.И. Донецкий<sup>1</sup>, Р.Ю. Караваев<sup>1</sup>, А.Е. Раскутин<sup>1</sup>, Н.Н. Панина<sup>1</sup>**СВОЙСТВА УГЛЕ- И СТЕКЛОПЛАСТИКОВ  
НА ОСНОВЕ ПЛЕТЕННЫХ ПРЕФОРМ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-54-59

Угле- и стеклопластики, выполненные на основе плетеных преформ, находят все более широкое применение при изготовлении новых образцов современной техники. Ведущие зарубежные компании – Boeing, Airbus, General Electric Aircraft Engines, Snecma и ряд других – внедрили такие полимерные композиционные материалы (ПКМ) в производство изделий как для аэрокосмической, так и гражданской продукции. В настоящее время данные технологии используются для изготовления стрингеров, шпангоутов, несущих конструкций авиационной техники, лопастей винтов, элементов фюзеляжа, шасси, трансмиссий, тяг управления и многого другого.

Основным преимуществом этих технологий является возможность получения заготовок из любого типа волокон практически неограниченной формы и размеров, создания материалов, которые характеризуются значительным сопротивлением к расслаиванию и удару, высокими показателями долговечности.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

**Ключевые слова:** плетеные преформы, эпоксидные связующие, углепластики, стеклопластики, вакуумная инфузия, угол армирования, физико-механические свойства.

Carbon fiber and fiberglass executed on the basis of braided preforms are widely applied in manufacturing new items of modern equipment. The leading foreign companies such as Boeing, Airbus, General Electric Aircraft Engines, Snecma and some other have implemented such polymer composite materials in aerospace and civil products. Now these technologies are used for manufacturing of stringer, frames, load-carrying structures of aviation engineering, propeller blades, elements of fuselage, the chassis, transmissions, drafts of management and many others. The main advantage of these technologies is possibility of obtaining workpieces from any type of fibers of almost unlimited form and size, obtaining materials which are characterized by considerable resistance to delaminating and blow, high fatigue rates.

The work is executed within the implementation of the complex scientific direction 13.2. «Constructional PCM» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

**Keywords:** braided preforms, carbon fiber, fiberglass, epoxy binders, non-autoclave molding methods, angle reinforcement, physical and mechanical properties.

<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

**Введение**

Производство полимерных композиционных материалов (ПКМ) – одно из самых быстро развивающихся в мире направлений промышленности. Преимуществом композиционного материала является то, что материал, технология и конструкция создаются одновременно – этим определяется высокая степень инноваций на всех этапах жизненного цикла материала: от получения исходного сырья и моделирования до создания и эксплуатации изделий [2–5].

Использование передовых композиционных материалов в настоящее время определяет уровень развития продукции как в аэрокосмической, так и гражданской отраслях промышленности, а

направление развития промышленных лидеров этих отраслей однозначно указывает на то, что обеспечение конкурентоспособности невозможно без применения передовых достижений в области материаловедения [6].

На смену длительное время доминирующим в технологии изготовления конструкционных ПКМ методам препрегово-автоклавного и горячего прессования препрегов, которые обеспечивали высокий уровень физико-механических свойств и низкую пористость получаемых пластиков, но характеризующихся повышенными энергоемкостью и стоимостью из-за использования дорогостоящих автоклава, оснастки и технологических материалов, пришли безавтоклавные процессы

пропитки наполнителя [7–9], позволяющие создавать материалы, используемые в широком диапазоне температур и климатических условий [10, 11].

Один из них – перспективный метод изготовления ПКМ с использованием плетеных преформ, который является конкурентоспособной альтернативой такому уже давно используемому технологическим процессу, как намотка. Возможность получения материалов с точным соответствием производимого изделия заданной внешней форме, устойчивостью к деформационным разнонаправленным нагрузкам, изотропностью или, наоборот, при необходимости – градиентностью свойств, снижением массы конструкций при сохранении высоких эксплуатационных свойств [12–14], сокращением трудоемкости технологических процессов – все это является серьезными достоинствами этого процесса. Использование плетеных преформ, которые характеризуются высокой подвижностью нитей и способностью создавать криволинейные поверхности сложной формы, позволяет решать задачу изготовления изделий сложной формы достаточно просто, обеспечивая при этом возможность автоматизации процесса [15]. Кроме того, данный способ изготовления ПКМ характеризуется возможностью оплести оправки сложной формы, что приводит к значительному разнообразию изготавливаемых материалов и позволяет применять при изготовлении изделий современные, экономически эффективные безавтоклавные технологии пропитки, в первую очередь – вакуумную инфузию и пропитку под давлением [16].

Современные технологии плетения позволяют изготавливать преформы из практически любого волокна, например – углеродного, стеклянного, базальтового или природного происхождения, и проектировать изделия с широким спектром свойств и с широким ценовым диапазоном.

В отечественном производстве данные технологии получили развитие только в последнее вре-

мя, что связано в первую очередь с необходимостью обновления парка используемого оборудования. Только в последние годы в РФ появились качественные современные плетельные машины как российского, так и зарубежного производства, предназначенные для производства преформ при изготовлении изделий из ПКМ [17]. Ранее в России предпринимались попытки изготовления ряда опытных (изготавливаемых ручным способом) образцов изделий на основе плетеных армирующих преформ, таких как лопатка авиадвигателя, рама иллюминатора, но развития эти технологии не получили из-за отсутствия своей завершенности и воплощения в серийную продукцию [18]. Вместе с этим все больше отечественных специалистов исследовательских и промышленных организаций обращают внимание на этот перспективный способ изготовления изделий, но серьезных исследований и оценок характеристик таких материалов в РФ не проводилось.

#### Материалы и методы

В качестве используемых материалов для изготовления плетеных преформ выбрали хорошо известные в РФ ровинги как зарубежного, так и российского производства: углеровинг 12К и стеклоровинг 1200 tex. В качестве схемы армирования плетеной преформы выбрана биаксиальная, с тремя углами укладки волокна:  $\pm 30$ ,  $\pm 45$  и  $\pm 60$  град. На рис. 1 приводится процесс изготовления плетеной преформы из стеклоровинга 1200 tex и сама преформа в виде рукава.

Из научной и патентной литературы известно значительное влияние выбора связующего (полимерной матрицы) на свойства получаемого материала. От матрицы зависят многие свойства композита, в том числе прочность, тепло- и влагостойкость, стойкость к действию агрессивных сред. Матрица должна обладать достаточной жесткостью и обеспечивать совместную работу армирующих волокон; ее прочность является определяющей при нагружении, не совпадающем

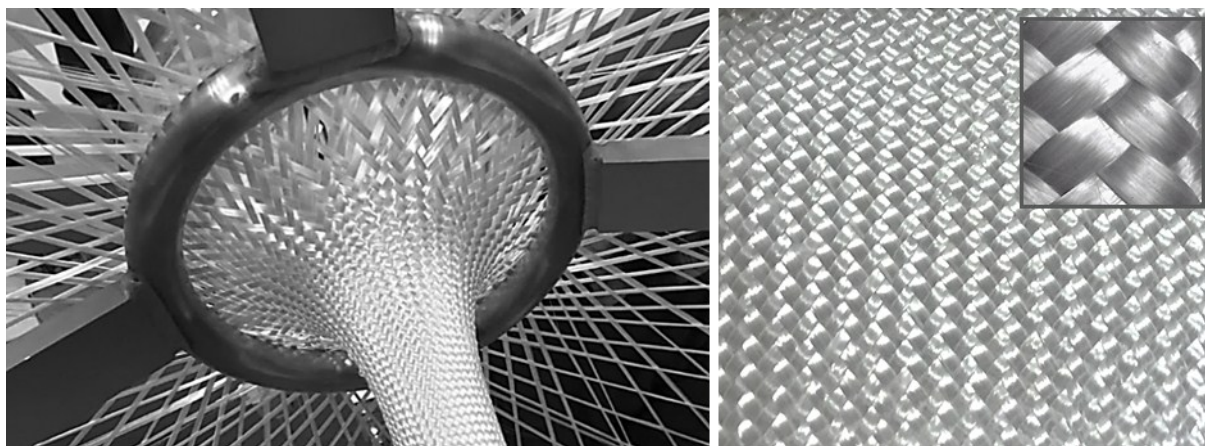


Рис. 1. Изготовление плетеной преформы из стеклоровинга 1200 tex

по направлению с ориентацией волокон. Особенно важным является свойство матрицы образовывать непрерывно наполненный материал, в котором она сохраняет свою структуру вплоть до разрушения волокон [19].

Авторами выбраны две полимерные системы на основе эпоксидных связующих разработки ВИАМ, отличающиеся типом используемого отвердителя. Для получения эпоксидных связующих используются отвердители, введение которых в композицию, как правило, ограничивает технологическую жизнеспособность связующего, но в то же время, применяя различные отвердители или их смеси, становится возможным направленно изменять свойства композиции и получать материалы с заданными характеристиками. Именно выбор отвердителя является определяющим фактором для обеспечения технологических и эксплуатационных характеристик материалов. В мировой практике до 80% эпоксидных связующих имеют в своем составе отвердители аминного типа различной структуры. По сравнению с аминами, в относительных объемах использование ангидридных отвердителей занимает более скромное место – на их долю приходится всего 16%, а остальное количество смол содержит в своем составе отвердители каталитического действия и олигомеры. Процесс отверждения аминными отвердителями сопровождается значительным экзотермическим эффектом, в результате чего связующее может саморазогреться до температуры, значительно превышающей 80–100°C. Такой саморазогрев может не только превышать температуру термической деструкции матрицы связующего, но и приводить к самовозгоранию. Процесс отверждения ангидридом также сопровождается выделением тепла, но протекает более медленно, чем в случае применения аминных отвердителей, не сопровождается значительным разогревом, что делает отвердители этого класса более технологичными и безопасными для процессов получения крупногабаритных изделий.

Таким образом, для сопоставления свойств авторы использовали связующее марки ВСЭ-21

[20, 21] с аминным отвердителем и экспериментальное – марки Э-1 с ангидридным отвердителем, наработаны экспериментальные партии данных связующих и проведены исследования их основных свойств (табл. 1). Связующее марки ВСЭ-21 разработано для эксплуатации в температурном интервале от -60 до +120°C. Оно представляет собой двухкомпонентный состав, образующий после смешения гомогенный низковязкий расплав с вязкостью от 50 до 200 МПа·с при температуре переработки от 60 до 100°C. В зависимости от требуемой вязкости связующего время его переработки варьируется от 10 до 300 мин.

Экспериментальное связующее Э-1 пригодно для изготовления ПКМ с рабочими температурами от -60 до +120°C. Это также двухкомпонентная композиция, которая готовится в момент использования, характеризуется низкой вязкостью при температуре переработки 25°C: 200 МПа·с. Данное связующее обладает технологической жизнеспособностью не менее 8 ч при температуре 25°C.

Из данных табл. 1 следует, что оба связующих (ВСЭ-21 и Э-1) обладают достаточно низкими характеристиками вязкости и вместе с тем высокой технологической жизнеспособностью, что делает их пригодными для проведения пропитки плетеных преформ методом вакуумной инфузии.

С использованием представленных ранее плетеных преформ и связующих изготовлены образцы ПКМ с помощью стандартной сборки пакета и схемы проведения процесса вакуумной инфузии (рис. 2).

### Результаты

Способом вакуумной инфузии изготовлены экспериментальные образцы ПКМ на основе армирующих угле- и стеклонаполнителей с биаксиальной схемой армирования и углами укладки: ±30, ±45 и ±60 град, полученных способом объемного плетения на основе углеровинга 12К и стекловолокна 1200 tex соответственно и связующих ВСЭ-21, Э-1 и Э-2.

В процессе проведения пропитки отмечено, что по своим вязкостным и реологическим свой-

Таблица 1

Физико-химические и технологические свойства связующих ВСЭ-21 и Э-1

Показатели	Значения показателей связующих	
	ВСЭ-21	Э-1
Температура стеклования, °C (не менее)	150	185
Температура стеклования во влагонасыщенном состоянии, °C (не менее)	120	165
Предел прочности при растяжении, МПа	60–80	48
Температура переработки/вязкость	60°C/0,2 Па·с	25°C/0,2 Па·с
Показатели технологической жизнеспособности	При 60°C в течение 4 ч вязкость не более 1 Па·с	При 25°C в течение 8 ч вязкость не более 0,3 Па·с

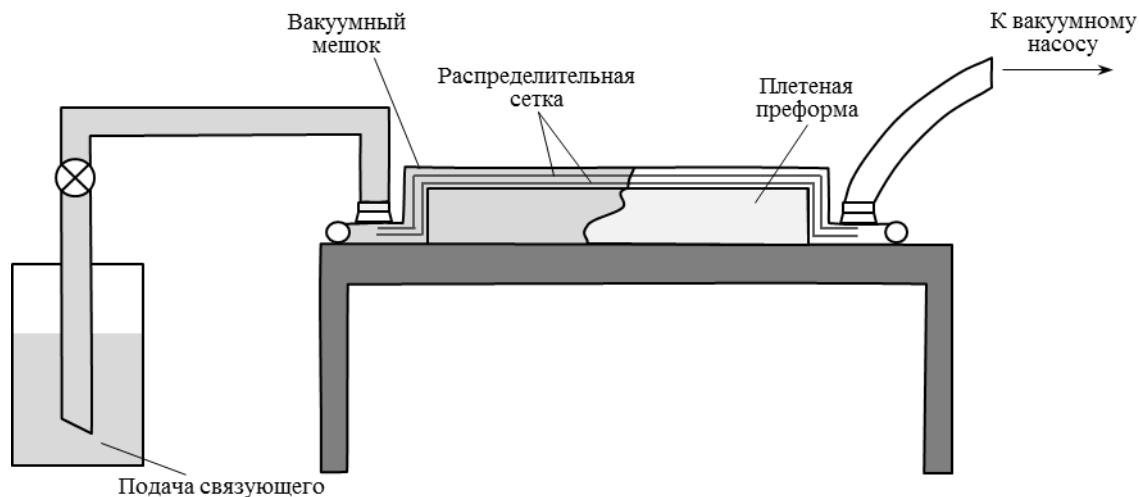


Рис. 2. Схема проведения пропитки плетеных преформ полимерным связующим методом вакуумной инфузии

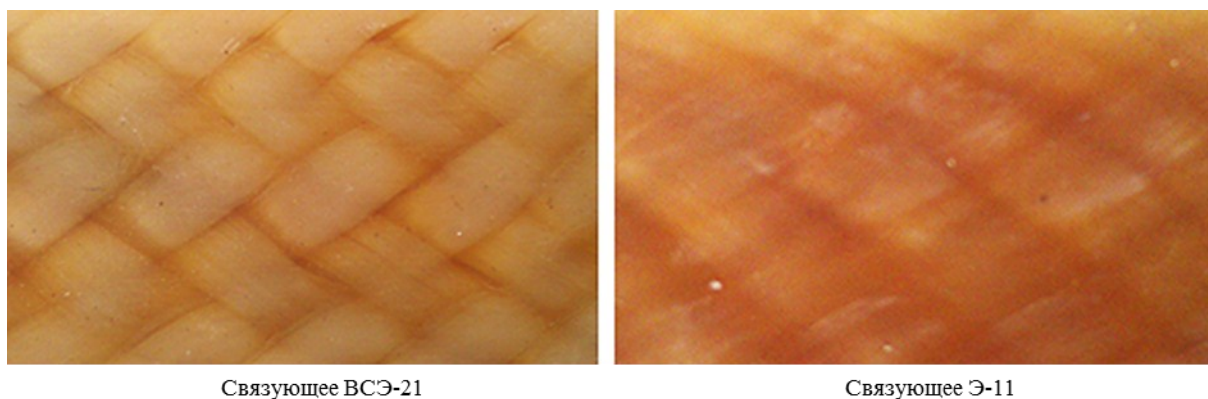


Рис. 3. Образцы ПКМ, изготовленные на основе армирующих стеклонаполнителей, полученных способом объемного плетения, и приведенных связующих

Таблица 2

**Основные свойства опытных образцов ПКМ на основе плетеных преформ из армирующего угленаполнителя 12К (с армированием ±30, ±45, ±60 град) и связующих ВСЭ-21 и Э-1**

Схема армирования	Значения свойств полимерных композиционных материалов на основе связующего					
	Э-1			ВСЭ-21		
	$\sigma_v$	$\sigma_{v,сж}$	$\sigma_{v,и}$	$\sigma_v$	$\sigma_{v,сж}$	$\sigma_{v,и}$
	МПа					
±30 град	310	305	730	330	240	640
±45 град	250	250	610	210	210	510
±60 град	160	160	450	190	170	400

Таблица 3

**Основные свойства опытных образцов ПКМ на основе плетеных преформ из армирующего стеклонаполнителя 1200 tex (с армированием ±30, ±45, ±60 град) и связующих ВСЭ-21 и Э-1**

Схема армирования	Значения свойств полимерных композиционных материалов на основе связующего					
	Э-1			ВСЭ-21		
	$\sigma_v$	$\sigma_{v,сж}$	$\sigma_{v,и}$	$\sigma_v$	$\sigma_{v,сж}$	$\sigma_{v,и}$
	МПа					
±30 град	225	225	710	315	285	900
±45 град	190	200	570	175	230	610
±60 град	150	160	410	160	170	465

Таблица 4

## Пористость стекло- и углепластиков на основе связующих ВСЭ-21 и Э-1

Значения свойств полимерных композиционных материалов на основе связующего					
ВСЭ-21			Э-1		
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Пористость углепластика	Пористость стеклопластика	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Пористость углепластика	Пористость стеклопластика
	%			%	
1531	1,61	1,71	1868	1,58	1,35
1534	1,70	1,75	1878	1,50	1,42
1535	1,72	1,66	1915	1,62	1,52
1534	1,70	1,75	1881	1,64	1,45
1531	1,61	1,69	1868	1,51	1,35
Среднее значение					
1533	1,67	1,71	1882	1,57	1,42

ствам связующее ВСЭ-21 и опытное связующее Э-1 оказались достаточно технологичными при проведении пропитки преформ. При использовании связующего ВСЭ-21 (в отличие от связующего Э-1) наблюдалось значительное уменьшение вязкости при прогреве пакета до 90°C во время пропитки, что приводило к значительным «потерям» связующего и соответственно нарушению необходимого соотношения «волоконно-связующее» в ПКМ. Для компенсации этого негативного явления, необходимо применение мембраны при проведении процесса пропитки. Проведенные эксперименты показали, что при схожих схемах сборки пакета, режиме подачи связующего и укладке материала при использовании как экспериментального связующего Э-1, так и связующего ВСЭ-21 процесс инфузии протекает одинаково успешно.

В целом необходимо отметить, что плетеные преформы пропитываются дольше чем угле- и стеклоклткани, выполненные из волокна схожего номинала. Вероятнее всего, это объясняется более плотной «укладкой» волокна в преформе, которая возникает при более сильном натяжении нитей в плетельной машине при изготовлении материала. На рис. 3 приведены фотографии образцов стеклопластиков, выполненных на основе связующих ВСЭ-21 и Э-1. Видно, что обеспечивается (в большей степени в случае использования связующего ВСЭ-21) качественная пропитка преформы и отсутствие «сухих» областей в структуре ПКМ.

Проведено испытание основных физико-механических свойств образцов ПКМ на основе армирующих плетеных стекло- и углепреформ с армированием  $\pm 30$ ,  $\pm 45$ ,  $\pm 60$  град, полученных способом объемного плетения, и связующих ВСЭ-21 и Э-1 (табл. 2 и 3).

Методом гидростатического взвешивания определены пористость и плотность ПКМ на основе угле- и стекловолокна и связующих ВСЭ-21 и Э-1 (табл. 4).

**Обсуждение и заключения**

Из данных, приведенных в табл. 2–4, видно, что угол армирования плетеной преформы напрямую влияет на физико-механические свойства ПКМ, изготовленных на их основе. С увеличением угла плетения прочность материала при растяжении, сжатии и изгибе уменьшается. Механические свойства материала, изготовленного на основе углеволокна с углами армирования от  $\pm 30$  до  $\pm 60$  град и связующего Э-1, на  $\sim 10$ –15% выше, чем свойства материала на основе углеволокна и связующего ВСЭ-21. И наоборот, механические свойства материала, изготовленного на основе стекловолокна с углами армирования от  $\pm 30$  до  $\pm 60$  град и связующего Э-1, на 10–20% ниже, чем свойства материала на основе стекловолокна и связующего ВСЭ-21.

Методом гидростатического взвешивания определена пористость полученных образцов стекло- и углепластиков.

Несмотря на то что плетеные преформы пропитываются дольше, чем угле- и стеклоклткани, выполненные из волокна схожего номинала, а авторы предполагали возможность недопропитки материала, из данных табл. 4 видно, что значения пористости не превышают 1,7%. Данные значения являются достаточно низкими для ПКМ, что позволяет говорить о возможности использования технологии вакуумной инфузии для изготовления как стекло-, так и углепластиков на основе плетеных преформ и различных полимерных связующих. Для контроля измерений пористости стеклопластика применяли также метод выжигания образцов ПКМ (испытания проведены в соответствии с ASTM D2584). Характерно, что показатели пористости не отличались более чем на 1–3%.

Таким образом, процесс вакуумной инфузии вполне применим для изготовления конструктивных ПКМ, выполненных на основе плетеных преформ. Влияние угла армирования, определяе-

мого еще на этапе изготовления преформы на плетельной машине, является основной характеристикой, определяющей физико-механические свойства ПКМ.

Эпоксидные связующие ВСЭ-21 и Э-1 пригодны для проведения пропитки плетеных преформ методом вакуумной инфузии. Эпоксид-

минное связующее ВСЭ-21 предназначено для изготовления ПКМ с рабочей температурой до 80°C, экспериментальное эпоксидангидридное связующее Э-1 – до 120°C, при этом физико-механические свойства ПКМ находятся на одном уровне.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
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. Тимошков П.Н., Коган Д.И. Современные технологии производства полимерных композиционных материалов нового поколения // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2013. №4. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.07.2015).
5. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // *Наука и жизнь*. 2010. №4. С. 2–7.
6. Берлин А.А. Современные полимерные композиционные материалы (ПКМ) // *Соросовский образовательный журнал*. 1995. №1. С. 58–66.
7. Composition of and method for making high performance resins for infusion and transfer molding processes: pat. 6359107 US; publ. 19.03.02.
8. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Абрамов П.А. Пути повышения качества деталей из ПКМ при вакуумном формовании // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012. Т. 14. №4 (3). С. 831–838.
9. Постнова М.В., Постнов В.И. Опыт развития безавтоклавных методов формования ПКМ // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2014. №4. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.07.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-4-6-6.
10. Каблов Е.Н., Гращенко Д.В., Ерасов В.С., Анчевский И.Э., Ильин В.В., Вальтер Р.С. Стенд для испытаний на климатической станции ГЦКИ крупногабаритных конструкций из ПКМ // *Сб. докл. IX Международ. науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон-2012»*. 2012. С. 122–123.
11. Каблов Е.Н., Кириллов В.Н., Жирнов А.Д., Старцев О.В., Вапиров Ю.М. Центры для климатических испытаний авиационных ПКМ // *Авиационная промышленность*. 2009. №4. С. 36–46.
12. Braided reinforcement for aircraft fuselage frames and method of producing the same: pat. 8210086B2 US; publ. 03.07.12.
13. Донецкий К.И., Хрульков А.В., Коган Д.И., Белин П.Г., Лукьяненко Ю.В. Применение объемно-армирующих преформ при изготовлении изделий из ПКМ // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №1. С. 35–39.
14. Власенко Ф.С., Раскутин А.Е., Донецкий К.И. Применение плетеных преформ для полимерных композиционных материалов в гражданских отраслях промышленности (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2015. №1. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.07.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-5-5.
15. 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.
16. 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.
17. Донецкий К.И., Коган Д.И., Хрульков А.В. Свойства полимерных композиционных материалов, изготовленных на основе плетеных преформ // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2014. №3. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.07.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-5-5.
18. Композитная лопатка вентилятора с многослойным армирующим материалом: пат. 2384749 Рос. Федерация; опубл. 20.03.10. Бюл. №8.
19. Михайлин Ю.А. *Конструкционные полимерные композиционные материалы*. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 822 с.
20. Меркулова Ю.И., Мухаметов Р.Р. Низковязкое эпоксидное связующее для переработки методом вакуумной инфузии // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №1. С. 39–41.
21. Мухаметов Р.Р., Меркулова Ю.И., Чурсова Л.В. Термореактивные полимерные связующие с прогнозируемым уровнем реологических и деформативных свойств // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2012. №5. С. 19–21.