

УДК 678.8

*К.И. Донецкий¹, Р.Ю. Караваяев¹, А.Е. Раскутин¹, В.А. Дун²***УГЛЕПЛАСТИК НА ОСНОВЕ ОБЪЕМНО-АРМИРУЮЩЕЙ ТРИАКСИАЛЬНОЙ ПЛЕТЕНОЙ ПРЕФОРМЫ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-55-63

Рассматривается углепластик на основе объемно-армирующей триаксиальной плетеной преформы, изготавливаемый способом вакуумной инфузии с использованием расплавленного эпоксидного связующего. Приведены возможные сферы применения такого материала и его физико-механические свойства. Показано, что при изготовлении конструкций, работающих при воздействии наружного гидростатического давления, важной задачей является снижение их массогабаритных характеристик. Применение углепластика на основе объемно-армирующей плетеной преформы позволит улучшить весовые характеристики, что приведет в свою очередь к повышению технических характеристик изготавливаемых конструкций.

Ключевые слова: армирующие плетеные преформы, углепластик, эпоксидное связующее, вакуумная инфузия, угол армирования, физико-механические свойства, наружное гидростатическое давление.

*K.I. Donetskiy¹, R.Yu. Karavaev¹, A.E. Raskytin¹, V.A. Dun²***CARBON FIBERS COMPOSITE MATERIAL ON THE BASIS OF VOLUME REINFORCING TRIAX BRAIDING PREFORMES**

In work it is considered carbon fibers composite on the basis of volume reinforcing triax braiding preformes, made in the way of vacuum infusion with use of the molten epoxy binding. Possible scopes of such material and its physicomechanical properties are given. It is shown that when manufacturing the designs working at influence of outside hydrostatic pressure, important task is decrease in their weight and dimensional characteristics. Application carbon fibers composite on the basis of volume reinforcing braiding preformes will allow to improve weight characteristics that will lead in turn to increase of technical characteristics of made designs.

Keywords: reinforcing braided preforms, carbon fibers composite material, epoxy binding, vacuum infusion, reinforcing corner, physicomechanical properties, outside hydrostatic pressure.

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

²Акционерное общество «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор» [Joint Stock Company «Concern Sea Underwater Wearons – Gidropribor»]; e-mail: info@gidropribor.ru

Введение

Одним из самых быстро развивающихся в мире направлений промышленности является производство полимерных композиционных материалов (ПКМ). Достоинством 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 проектирования до создания и эксплуатации изделий.

Применение современных ПКМ в настоящее время определяет уровень развития как в аэрокосмической, так и в гражданской отраслях промышленности [1–3]. На смену преобладающим в технологии изготовления конструкционных ПКМ методам препрегово-автоклавного и горячего прессования препрегов, которые обеспечивают высокий уровень физико-механических свойств и низкую пористость получаемых пластиков, но характеризуются повышенной энергоемкостью и стоимостью из-за использования дорогостоящих автоклава, оснастки и технологических материалов, появились безавтоклавные процессы пропитки, позволяющие создавать разнообразные материалы, используемые в широком температурном диапазоне и климатических условиях [4, 5].

Один из них – перспективный метод изготовления ПКМ с использованием объемно-армирующих плетеных преформ, который является возможной альтернативой такому уже давно используемому в промышленности технологическому процессу, как намотка. Обеспечение изготовления низкопористых материалов с устойчивостью к деформационным разнонаправленным нагрузкам, снижение массы при сохранении высоких эксплуатационных свойств [6, 7], сокращение трудоемкости технологических процессов – все это серьезные преимущества указанного процесса. Использование армирующих плетеных преформ с высокой подвижностью нитей и способностью оплетать криволинейные поверхности позволяет решать задачу изготовления изделий сложной формы достаточно просто, обеспечивая при этом возможность автоматизации процесса [8]. Возможность оплетать оправки сложной формы приводит к значительному разнообразию изготавливаемых материалов и позволяет применять при создании изделий экономически эффективные безавтоклавные технологии пропитки – в первую очередь вакуумную инфузию и пропитку под давлением (рис. 1) [9].

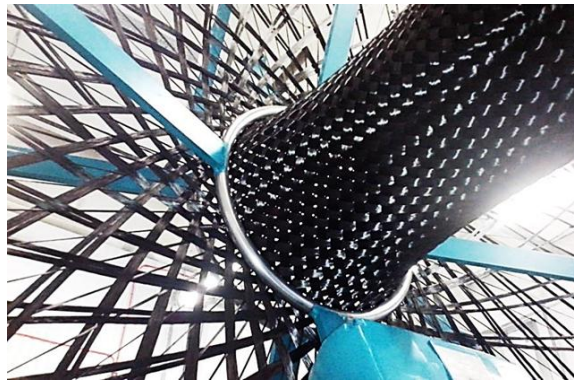


Рис. 1. Изготовление объемно-армирующих плетеных преформ из углеволокна

Современные технологии плетения позволяют изготавливать преформы из разнообразных волокон – например, углеродных, стеклянных или органических, а также проектировать изделия с широким спектром свойств и различным ценовым диапазоном. В отечественном производстве данные технологии получили развитие только в последнее время, что связано в первую очередь с обновлением парка используемого оборудования. В последние годы в РФ появились современные плетельные машины как российского, так и зарубежного производства для производства преформ, предназначенных для изготовления изделий из ПКМ.

Объемно-армирующие плетеные преформы широко применяются лидерами зарубежного авиастроения, такими как фирмы General Electric Aircraft Engines, Snecma, Boeing, Airbus, для производства элементов мотогондолы авиадвигателя и его вентиляторных лопаток, стрингеров, лонжеронов, шпангоутов, лопастей винтов, различных корпусных элементов и многого другого [10–14].

Возможной областью применения материалов на основе объемно-армирующей плетеной преформы также являются изделия, работающие при воздействии повышенного наружного гидростатического давления. В этом случае важной задачей проектирования таких объектов является снижение их массогабаритных характеристик. Возможности использования легких алюминиевых сплавов в отношении рассматриваемой проблемы в настоящее время практически исчерпаны, а применение стеклопластика при конструировании также не дает требуемой весовой эффективности. Реальной возможностью существенного снижения массогабаритных характеристик является применение углепластика, который по теоретическим прогнозам должен обеспечить снижение массы конструкций на 20–30% относительно изготавливаемых в настоящее время из металла, что приведет к существенному повышению технических характеристик изделий [15, 16]. Использование метода «мокрой» намотки дает ряд преимуществ для изготовления материалов, эксплуатирующихся в таких условиях, – в первую очередь это широкое распространение намоточного оборудования, процесс изготовления деталей цилиндрической формы на котором хорошо отработан. Кроме того, ввиду более высокого натяжения нити при изготовлении материала, конструкции, выполненные намоткой, имеют несколько более высокие механические свойства. В данном случае использование объемно-армирующих плетеных преформ является конкурентным способом изготовления цилиндрических деталей и конструкций, имеющим как достоинства, так и недостатки. Необходимо отметить, что конструкции из углепластика, получаемого по технологии «мокрой» намотки, обладают рядом недостатков (относительно «плетеных» материалов): более низкой межслоевой прочностью и негерметичностью, что является важным при использовании данного материала в условиях наружного гидростатического давления. Недостаточная межслоевая прочность не позволяет проводить механическую обработку поверхностей с достаточной точностью и чистотой. Низкая герметичность материала требует подмотки дополнительных несущих слоев в конструкцию изделия для обеспечения герметичности, что существенно снижает эффекты от использования ПКМ в части массогабаритных характеристик, а также существенно усложняет технологический процесс изготовления изделий в целом. Пластики, изготавливаемые на основе плетеных преформ безавтоклавным формованием, в большей степени лишены перечисленных недостатков.

Работа выполнена в рамках комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы» по комплексной научной проблеме 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

В качестве используемых материалов для изготовления плетеных преформ выбран углеродный ровинг российского производства номиналом 12К, доступный в продаже.

В качестве схемы армирования плетеной преформы выбрана триаксиальная с укладкой волокна $[0^\circ, \pm 45^\circ]$. В отличие от биаксиальной объемно-армирующей преформы, где происходит взаимное переплетение двух волокон в продольном направлении без участия третьей составляющей, в триаксиальном армировании в преформу вводится третья нить. Использование такой схемы позволяет увеличить механическую прочность ПКМ на основе плетеной преформы к осевым нагрузкам и повысить драпируемость, однако снижает возможности оплетки (и соответственно изготовления изделий) с переменным сечением [17].

От выбранного связующего зависят многие свойства полимерного материала, в том числе такие, как тепло- и влагостойкость, прочность, стойкость к воздействию агрессивных сред, при этом именно матрица обеспечивает связь волокон друг с другом,

создавая монолитный конструкционный материал. Для изготовления углепластика на основе объемно-армирующих плетеных преформ по низкотратной вакуумной инфузионной технологии, обычно используется расплавленное связующее с пониженной температурой и небольшой продолжительностью отверждения (не более 4 ч), что позволяет снизить энергозатраты на формование деталей на его основе, а также минимизировать образование пор по причине отсутствия легкокипящего растворителя (по сравнению с растворным связующим) [18].

В качестве такого связующего выбрано эпоксидное связующее марки ВСЭ-30 (производства ФГУП «ВИАМ»), некоторые свойства которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства эпоксидного связующего марки ВСЭ-30

Свойства	Значения свойств
Температура стеклования отвержденного связующего, °С (не менее)	117,3
Время гелеобразования при температуре 60±1,0°С, мин	45
Кажущаяся вязкость по Брукфильду при температуре 25,0±1,0°С, Па·с	0,45

Как следует из данных, приведенных в табл. 1, технологические свойства связующего вполне достаточны для изготовления ПКМ способом вакуумной инфузии. В процессе проведения пропитки показано, что по своим вязкостным и реологическим свойствам связующее ВСЭ-30 является достаточно технологичным для пропитки преформ.

Вакуумной инфузией изготовлены образцы углепластика на основе объемно-армирующих плетеных преформ и полимерного связующего ВСЭ-30 (рис. 2). Следует отметить, что армирующие плетеные преформы необходимо пропитывать несколько дольше, чем углеткани, выполненные из волокна схожего номинала. Вероятно, это объясняется более плотной «укладкой» волокна в преформе, которая получается при более сильном натяжении нитей в плетельной машине при изготовлении материала.



Рис. 2. Изготовление плоского (а) и цилиндрического (б) образцов из углепластика на основе объемно-армирующей плетеной преформы

Микроструктурный анализ полученных образцов ПКМ проведен на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 XMU в режиме вторичных электронов (SE). Поверхность разрушения углепластика на основе эпоксидного связующего ВСЭ-30 и объемно-армирующей плетеной преформы после испытания на растяжение представлена на рис. 3.

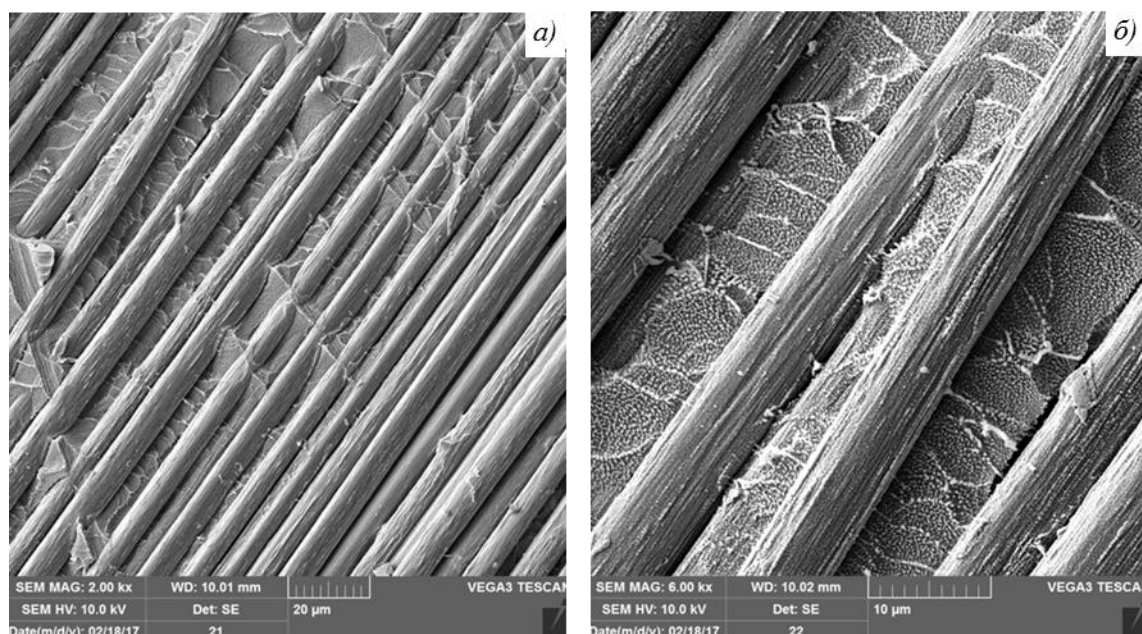


Рис. 3. Микроструктура (*a* – $\times 2000$; *б* – $\times 6000$) поверхности расслоения по границе между слоями углепластика на основе эпоксидного связующего ВСЭ-30 и объемно-армирующей плетеной преформы

Видно, что в объеме образца пространство между волокнами полностью заполнено связующим. На поверхности углеродных волокон наблюдается тонкая пленка матрицы, что указывает на хорошую адгезию между волокном и матрицей, микрофазовая структура матрицы однородна. Проведенные испытания подтвердили, что при разрушении образца не происходит отрыва связующего от волокна, что свидетельствует о правильности выбранного связующего для изготовления углепластика.

Результаты и обсуждение

В данной работе, методом вакуумной инфузии получены образцы углепластика с использованием триаксиальной преформы и эпоксидного связующего. Проведенный ультразвуковой контроль показал отсутствие каких-либо дефектов и расслоений углепластика. В табл. 2 приведены свойства полученного углепластика.

Таблица 2

Свойства (средние значения) углепластика на основе триаксиальной плетеной преформы (с укладкой волокна $[0^\circ, \pm 45^\circ]$) и эпоксидного связующего

Свойства	Значения свойств
Прочность при растяжении (по основе), МПа	535
Модуль упругости при растяжении (по основе), ГПа	69
Остаточная прочность после удара, МПа	265
Изгибающее напряжение, МПа	870
Прочность при межслойном сдвиге, МПа	46
Ударная вязкость (образец без надреза), Дж/м ²	130
Прочность при сжатии, МПа	390
Пористость, %	1,0

Из приведенных в табл. 2 данных видно, что полученные значения свойств при физико-механических испытаниях (с учетом угла армирования) являются достаточно высокими для этого класса материала – особенно для испытаний на изгиб и остаточную прочность после удара. Значения пористости материала, полученные методом гидростатического взвешивания, не превышают 1,0%, что является хорошим показателем для ПКМ, изготовленного способом вакуумной инфузии.

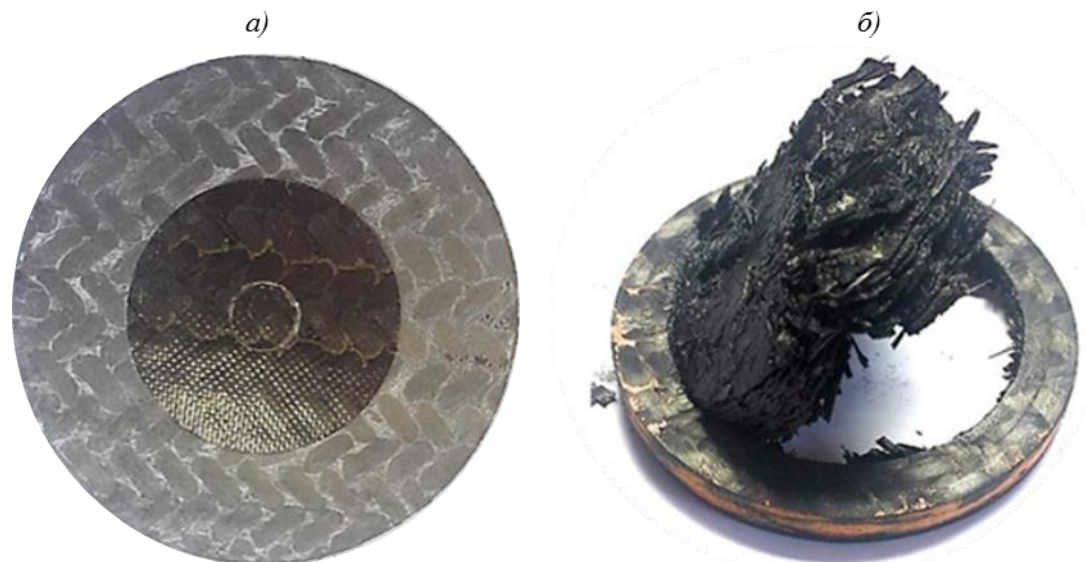


Рис. 4. Образцы из углепластика на основе триаксиальной плетеной преформы и эпоксидного связующего, разрушенные под действием одностороннего гидростатического давления (*a* – образец перед испытанием; *б* – образец после испытания)

Важным результатом проведенной работы являются полученные данные при проведении испытаний углепластика на внешнее гидростатическое давление – как плоских образцов, так и образцов цилиндрической формы. При исследовании разрушающего воздействия одностороннего гидростатического давления на плоские образцы (рис. 4) получены величины давлений, при которых происходило резкое падение испытательного давления, что свидетельствовало о полном разрушении образца или о существенном нарушении его структуры с последующей потерей герметичности. Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Таблица 3

Средние значения величины разрушающего одностороннего гидростатического давления в зависимости от толщины углепластика

Толщина образца, мм	Разрушающее давление, МПа
4,5	21,0
6,5	30,2
8,7	47,0

В результате разрушения образцов наблюдались масштабные повреждения по всей рабочей поверхности и характерный кольцевой срез в виде расслоений, а разрушение происходило с характерным хлопком и существенным падением давления в гидробарокамере – на ~70%.

Для цилиндрических образцов углепластика (рис. 5), также проведены испытания на внешнее гидростатическое давление – как кратковременное, так и длительное. В случае кратковременных испытаний все поступившие на испытания образцы предварительно проверяли на герметичность внутренним воздушным давлением, негерметичные – доработаны с целью получения герметичности, а затем сборку помещали в автоклав. Определен следующий режим испытаний: давление в автоклаве поднимали ступенями через 100 Н/см^2 с выдержкой по 2 мин на каждой ступени. Давление поднимали до разрушения, о котором судили по скачку давления на манометре, либо до принятия решения о потере герметичности сборки (по существенному превышению фактического давления в автоклаве относительно ожидаемого давления разрушения образца).

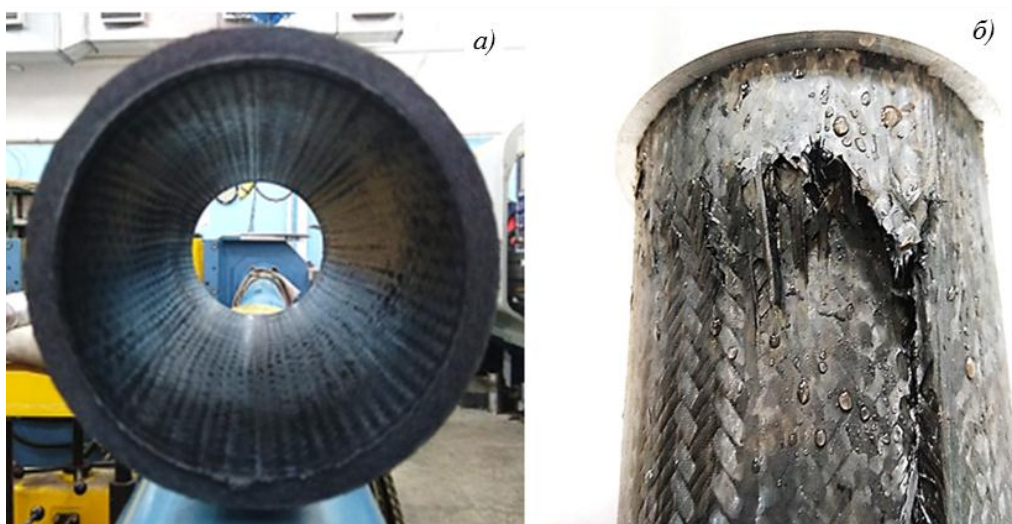


Рис. 5. Цилиндрический образец углепластика на основе плетеной преформы после механической обработки поверхности (а) и после гидростатических испытаний в автоклаве (б)

Длительные испытания проводили по схожей схеме. Перед постановкой в автоклав каждую сборку проверяли на герметичность внутренним воздушным давлением; давление в автоклаве до испытательного значения поднимали ступенями по 100 Н/см^2 с выдержкой по 2 мин на каждой ступени, затем каждый образец выдерживали под действием испытательного давления в течение 7 сут. Регулярно (дважды в сутки) проводили проверку фактического давления и по истечении 7 сут сборку извлекали из автоклава. Далее образцы испытывали при воздействии гидростатического давления до разрушения.

Результаты проведенных в автоклаве гидростатических испытаний (кратковременных и длительных) показали, что:

- материал образцов герметичен при воздействии внутреннего воздушного давления 3 Н/см^2 , а также кратковременного воздействия интенсивностью до 2950 Н/см^2 и длительно действующего (до 7 сут) наружного гидростатического давления интенсивностью до 1450 Н/см^2 ;

- механическая обработка образцов по наружной поверхности и торцам не нарушает герметичности материала;

- качество материала достаточно для использования стандартных уплотнительных узлов без дополнительной механической обработки, т. е. качество обеспечивалось на этапе изготовления заготовок;

- технология обеспечивает возможность получения герметичного материала.

Заключения

Использование углепластика, изготавливаемого вакуумной инфузией на основе триаксиальной объемно-армирующей плетеной преформы, является эффективным способом изготовления как материалов, так и элементов конструкций на его основе. Применение расплавленного связующего с пониженной температурой отверждения позволит снизить затраты на формование изделий на его основе и получить низкопористый материал.

Данный материал является перспективным для конструкций, работающих в том числе и при воздействии наружного гидростатического давления. Реализация всех достоинств этого метода напрямую связана с пониманием особенностей как самого процесса изготовления преформы, так и способа формования самого изделия под его практическое использование. Представляется несомненно важным знание закономерностей процесса и технологии изготовления ПКМ на основе армирующих плетеных преформ с целью получения материала именно с теми свойствами, которые от него ожидаются. Развитие и применение данных решений в высокотехнологичных отраслях российской промышленности позволит придать дополнительный импульс для изготовления новых образцов техники различного назначения.

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. Композиты: сегодня и завтра // *Металлы Евразии*. 2015. №1. С. 36–39.
3. Борщев А.В., Гусев Ю.А. Полимерные композиционные материалы в автомобильной промышленности // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S2. С. 34–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s2-34-38.
4. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
5. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Иноземцев А.А. Влагонасыщение конструктивно-подобных элементов из полимерных композиционных материалов в открытых климатических условиях с наложением термоциклов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №2. С. 56–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-56-68.
6. Braided reinforcement for aircraft fuselage frames and method of producing the same: pat. 8210086B2 US; publ. 03.07.12.
7. Душин М.И., Донецкий К.И., Караваев Р.Ю. Установление причин образования пористости при изготовлении ПКМ // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №6 (42). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.12.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-8-8.
8. 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.
9. 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: 14.12.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-5-5.
10. Erber A., Birkefeld K., Drechsler K. The influence of braiding configuration on damage tolerance of drive shafts // *SAMPE EUROPE: 30th International Jubilee Conference and Forum*. 2010. P. 364–371.
11. Branscomb D., Beale D., Broughton R. New directions in braiding // *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2013. No. 8 (2). P. 11–24.

12. 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: 14.12.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-5-5.
13. Lebel L.L., Nakai A. Design and manufacturing of an L-shaped thermoplastic composite beam by braid-trusion // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. 2012. No. 43 (10). P. 1717–1729.
14. Kohlman L.W., Bail J.L., Roberts G.D. et al. A notched coupon approach for tensile testing of braided composites // NASA Publications. 2012. No. 65. P. 1–9.
15. Дун В.А., Петровский О.Л., Румянцев А.Ф., Ушаков П.Г. Результаты применения углепластика для изготовления малогабаритных корпусов // Судостроительная промышленность, серия ПВМО. 1986. Вып. 2. С. 70–75.
16. Композитный корпус глубоководного технического средства: пат. 2453464 Рос. Федерация; заявл. 17.08.10; опубл. 20.06.12.
17. Carey J.P. Handbook of Advances in Braided Composite Materials. Woodhead Publishing is an Imprint of Elsevier, 2017. No. 72. P. 3–6.
18. Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Панина Н.Н., Ткачук А.И., Терехов И.В. Использование ароматических аминных отвердителей для создания эпоксидных связующих для ПКМ конструкционного назначения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №6 (42). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.12.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-4-4.