

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-27-38

УГЛЕПЛАСТИК НА ОСНОВЕ ОБЪЕМНО-АРМИРУЮЩЕЙ ПЛЕТЕНОЙ ПРЕФОРМЫ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТА ЛОПАСТИ ВОЗДУШНОГО ВИНТА*К.И. Донецкий¹, Р.Ю. Караваев¹, Д.В. Быстрикова¹, А.Д. Грачева¹*

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. В настоящее время одной из мировых тенденций при разработке авиационных двигателей является замена металлических сплавов на композиционные материалы, что позволяет добиться значительного снижения массы изделий и повышения их эксплуатационных характеристик. Применение современных методов моделирования процесса проведения пропитки углеродного наполнителя способствует сокращению времени разработки как самого материала, так и изделия на его основе. Необходимо при создании материалов нового поколения использовать многоуровневый подход – моделирование материала на микро-, мезо- и макроуровнях, а также рассматривать поведение элементарных образцов, элементов конструкций и изделий.

Ключевые слова: воздушный винт, полимерные композиционные материалы, углепластик, пропитка под давлением, эпоксидное расплавленное связующее, плетеные преформы, физические свойства, эксплуатационные свойства

Для цитирования: Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Быстрикова Д.В., Грачева А.Д. Углепластик на основе объемно-армирующей плетеной преформы для элемента лопасти воздушного винта // Труды ВИАМ. 2022. № 12 (118). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-27-38.

Scientific article

CARBON FIBER BASED ON A VOLUME-REINFORCING BRAIDED PREFORM FOR AN ELEMENT OF A PROPELLER BLADE*K.I. Donetskiy¹, R.Yu. Karavaev¹, D.V. Bystrikova¹, A.D. Gracheva¹*

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Currently, one of the global trends in the development of aircraft engines is the replacement of metal alloys with composite materials, which makes it possible to achieve a significant reduction in the weight of products and improve their performance. The use of modern methods of modeling the process of impregnation of carbon filler allows to reduce the development time of both the material itself and the product based on it. It is necessary to apply a multilevel approach when developing materials of a new generation – material modeling at nano-, micro-, meso- and macrolevels, behavior of elementary samples, structural elements and products.

Keywords: propeller, polymer composite materials, carbon fiber, pressure impregnation, epoxy hot melt binder, woven preforms, physical properties, performance properties

For citation: Donetskiy K.I., Karavaev R.Yu., Bystrikova D.V., Gracheva A.D. Carbon fiber based on a volume-reinforcing braided preform for an element of a propeller blade. *Trudy VIAM*, 2022, no. 12 (118), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-27-38.

Введение

Воздушный винт является важнейшей составляющей силовой установки. Во-первых, он непосредственно участвует в создании тяги, т. е. является двигателем; во-вторых, это элемент, который работает в условиях высоких нагрузок (центробежные и аэродинамические силы). Однако вращающийся воздушный винт при определенных условиях является источником возникновения вихревого течения, что делает его уязвимым для попадания посторонних предметов. Данный фактор способствует возникновению серьезной проблемы – преждевременному съему воздушных винтов с эксплуатации.

Таким образом, к воздушному винту предъявляется комплекс требований в широком диапазоне условий эксплуатации. Поэтому для создания современных винтов с высокой тягой необходимо совершенствование как их конструкции, так и применяемых материалов, а также технологий изготовления. Совершенствование воздушного винта – залог экономичной и надежной работы двигателя.

Лопастные двигатели летательных аппаратов (рабочие части винтов турбовинтовых двигателей военно-транспортных самолетов, бомбардировщиков, рулевые винты вертолетов) в большинстве своем производят из металлических сплавов или полимерных композиционных материалов (ПКМ), изготовленных с использованием тканых (слоистых) наполнителей. Негативным фактором, влияющим на работоспособность слоистых ПКМ в конструкции, является пониженная способность противостояния механическим ударным воздействиям. Актуальной в настоящее время является также задача разработки облегченных лопастей воздушного винта, изготовленных из ПКМ с учетом обеспечения прочности и эксплуатационной надежности. Работы по внедрению полимерных композитов для авиастроения в Российской Федерации начались в конце 1970-х гг. при создании первого воздушного винта с лопастями из ПКМ для самолетов Як-18 и Як-52 [1–3].

Анализ отечественных и зарубежных научно-технических источников показал, что возможность реализации новых конструкторских решений в области изготовления лопастей воздушного винта может быть обеспечена при использовании ПКМ и новых технологий производства изделий.

Производители авиационной техники при разработке лопастей применяют стекло- и углепластики, а также гибридные материалы. Характерные для углепластиков свойства (плотность и высокая прочность) делают их перспективными для использования при изготовлении лопастей воздушного винта.

Наиболее крупные зарубежные разработчики воздушных винтов, а именно американская компания Hamilton Standart и английская Dowty Propellers, основным методом изготовления лопастей выбрали пропитку под давлением, при этом в качестве текстильного наполнителя используют как ткани, так и плетеные формы, применяемые для последующей пропитки.

Полимерные композиционные материалы на основе объемно-армирующей плетеной преформы обеспечивают более высокие прочностные характеристики при ударном воздействии в сопоставлении с традиционными слоистыми ПКМ [4].

На основании анализа научно-технической литературы сделан вывод, что на смену преобладающим при изготовлении воздушного винта металлическим сплавам, обеспечивающим достаточный уровень физико-механических свойств, но характеризующимся повышенными весовыми характеристиками, пришли более экономичные ПКМ, получаемые безавтоклавным формованием, которые дают возможность создавать большое количество материалов, используемых в широком диапазоне температур и климатических условий.

В настоящее время наиболее реализованным и перспективным процессом изготовления лопастей воздушного винта из ПКМ является метод пропитки под давлением армирующих наполнителей (волокон, жгутов, лент, однонаправленных и равнопрочных тканей, а также плетеных преформ) в жесткой пресс-форме [5, 6].

Возможность получать материалы с низкой пористостью, способные выдерживать деформационные нагрузки, а также способствующие уменьшению массы изделия при сохранении повышенных характеристик при эксплуатации и снижению трудоемкости технологических процессов, – одно из преимуществ процесса пропитки под давлением.

Установлено также, что ПКМ, созданные на основе объемно-армирующих преформ, имеют высокое сопротивление к повреждениям наряду с повышенными прочностными показателями и устойчивостью к тангенциальным нагрузкам (скручиванию). Преимуществом при использовании конструкций на основе объемно-армирующих плетеных преформ является и уменьшение количества технологических этапов производства, что позволяет изготовить преформу трубчатой конструкции с заданными размерами и внедренными (при необходимости) соединительными элементами за одну операцию [7–11].

Анализ научно-технической литературы [12–14] также показал, что основными технологиями, применяемыми при получении ПКМ для воздушного винта, являются:

- пропитка армирующего наполнителя методом пропитки под давлением в жесткой пресс-форме;
- технологии объемно-армирующего плетения наполнителей путем создания сетчатой биаксиальной/триаксиальной структуры с дальнейшей пропиткой под давлением.

Кроме того, определено [15–21], что:

- в качестве армирующих наполнителей используются любые волокна, однако чаще всего стекло- и углеволокна как однонаправленной, так и тканой структуры;
- в качестве связующего можно применять как традиционные эпоксидные связующие, так и другие полимеры (полиэфирэфиркетон, бисмалеимид, полиэфиримид, полиимид и др.), а также термопласты;
- конструкции из ПКМ обладают плотностью 1,4–1,9 г/см³, что приблизительно в 1,5 раза меньше плотности конструкции из алюминиевого сплава (до 2,7 г/см³) – это приводит к уменьшению весовых характеристик воздушного винта, выполненного из пластика.

Таким образом, можно сделать вывод, что применение объемно-армирующих плетеных преформ, характеризующееся возможностью создавать криволинейные поверхности сложной геометрической формы, позволяет производить конструкции с переменным сечением без использования ручной выкладки, обеспечивать легкое и надежное внедрение соединительных элементов в изготавливаемые лопасти воздушного винта [22–24].

Материалы и методы

Проведен выбор эпоксидного связующего для создания углепластика на основе объемно-армирующих плетеных преформ методом пропитки под давлением, а также их схем армирования и волокна.

От связующего зависят многие свойства полимерного композита, в том числе прочность, тепло- и влагостойкость, стойкость к действию агрессивных сред. Именно матрица связывает волокна друг с другом, создавая монолитный конструкционный материал. Опыт, полученный сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках выполнения проектов по разработке ПКМ с использованием способов безавтоклавного формования, позволяет определить требования к связующему для создания воздушного винта методом пропитки под давлением:

- вязкость при температуре переработки – не более 0,5 Па·с;
- сохранение вязкости при температуре переработки – не менее 3 ч;
- доступность компонентов связующего на рынке Российской Федерации.

Выбрано расплавленное эпоксидное связующее, разработанное в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, с низкой вязкостью при температуре переработки и значительным временем жизнеспособности (до 5,5 ч). Кроме того, в его составе отсутствуют компоненты импортного производства [25].

Выбор углеродного волокна проводили исходя из наличия серийного производства в Российской Федерации, в целях развития которого и для создания конкурентоспособной продукции на основе данного волокна в 2015 г. запущен завод по его производству – ООО «Алабуга-Волокно». Этот проект направлен на импортозамещение зарубежных углеродных волокон. По данным производителя, волокно марки Umatex применяется в качестве наполнителя при производстве углепластиков для изделий авиационной техники. В связи с этим выбрано волокно российского производства марки Umatex для изготовления объемно-армирующих плетеных преформ.

Проведен анализ существующих схем армирования ПКМ, получаемых на основе ровинга или тканей, и их применения при производстве преформ методом плетения. Существует две схемы армирования при изготовлении композиционного материала на основе объемно-армирующих преформ – биаксиальная и триаксиальная. Технология создания биаксиальной объемно-армирующей преформы состоит во взаимном сплетении волокон в продольном направлении (рис. 1, а) [26].

Кроме биаксиального, может применяться и триаксиальное армирование путем введения третьей нити в преформу (рис. 1, б). Использование такой схемы способствует повышению механической прочности композита на основе плетеной преформы к нагрузкам вдоль оси и драпируемости, при этом снижаются значения вероятности оплетки (и, следовательно, изготовления изделий) с переменным сечением.

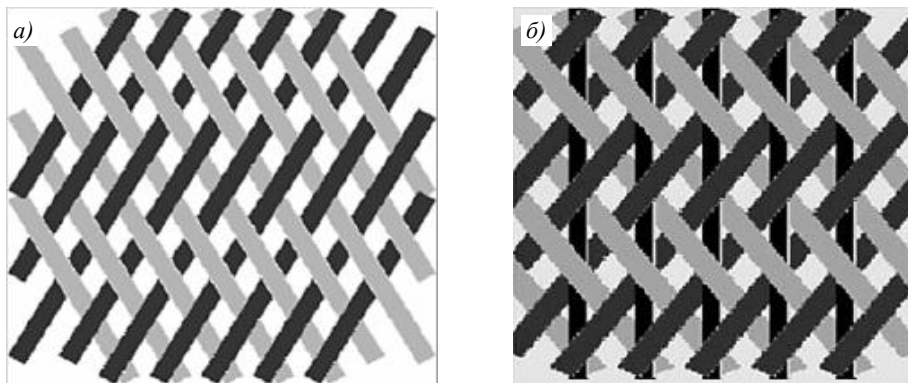


Рис. 1. Биаксиальная (а) и триаксиальная (б) схемы армирования объемно-армирующих плетеных преформ

Используемый угол армирования плетеной преформы также оказывает влияние на свойства разрабатываемого ПКМ, созданного на ее основе. Меняя угол, можно получать свойства, требуемые для конкретной конструкции, в зависимости от применяемого типа нагрузки – кручение, сдвиг.

Выбранные схемы армирования и угол переплетения позволяют создать заготовку, оптимально соответствующую типу нагрузки будущей конструкции. С учетом переменного сечения изготавливаемой конструкции биаксиальная схема армирования является оптимальным решением для изготовления изделия, а применение триаксиальной схемы армирования затруднительно [26].

Результаты и обсуждение

Выбрана схема армирования преформ с укладкой ± 45 градусов. Для проведения данной работы использовали расплавленное эпоксидное связующее, которое, так же как и изготовленные плоские образцы углепластика на основе объемно-армирующих плетеных преформ, разработано в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

В процессе изготовления образцов углепластика методом пропитки под давлением варьировали следующие параметры технологического процесса: продолжительность пропитки под вакуумом и величину избыточного давления. На рис. 2 представлены плиты углепластика в оснастке после проведения пропитки под давлением.

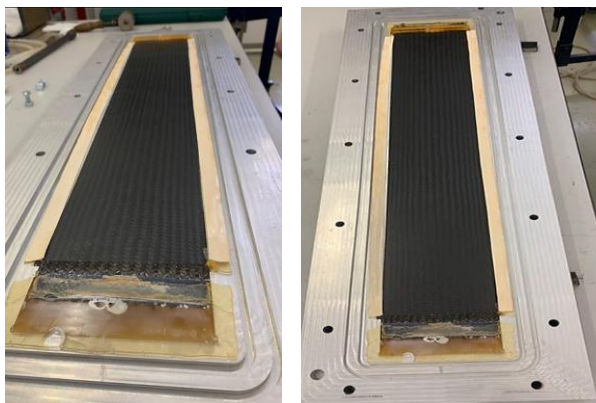


Рис. 2. Плиты углепластика в оснастке после проведения пропитки под давлением

Результаты ультразвукового контроля углепластика показали отсутствие в нем дефектов и расслоений. Исследование проводили высокочастотным эхо-импульсным методом с чувствительностью контроля, эквивалентной выявлению плоскодонного отражателя диаметром 5 мм. Сканирование преобразователем на фазированной решетке осуществляли по всей площади. Выполнен также рентгеновский компьютерный анализ образцов углепластика для определения объемной доли их пористости. На рис. 3 представлено изображение образца углепластика при проведении исследования.

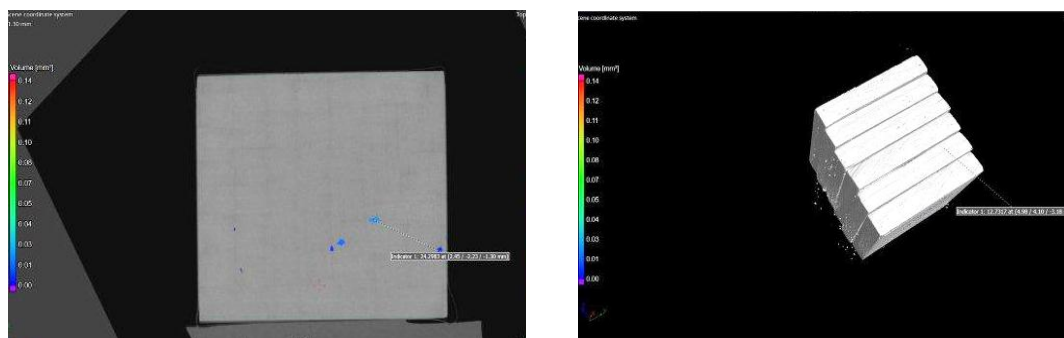


Рис. 3. Визуализация образца углепластика при проведении рентгеновской компьютерной томографии

Установлено, что, согласно полученной микроструктуре образцов углепластика, объемная доля пористости составляет 0,2 %, что свидетельствует о правильном выборе режимов.

Исследованы физические свойства углепластика на основе биаксиальной плетеной преформы и связующего производства НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Определены пористость, плотность, степень отверждения и температура стеклования углепластика [27]:

Свойства	Значения свойств
Объемная доля пористости, % (МИ 1.2.018–2010)	0,2
Плотность, г/см ³ (ГОСТ 15139–69)	Не более 1,55
Степень отверждения, % (ГОСТ Р 56755–2015)	Не менее 98,0
Температура стеклования, °С (ГОСТ Р 57739–2017)	Не менее 165

Определены также механические свойства (предел прочности) плоских образцов углепластика при температуре 20 °С:

Свойства	Значения свойств (не менее)
Предел прочности, МПа:	
при растяжении (СТО 1-595-11-505–2016)	450
при изгибе (ГОСТ 4648–2014)	650
при сжатии (ГОСТ Р 56797–2015)	340
при межслойном сдвиге (ГОСТ 32659–2014)	35

Образцы углепластика исследованы после натуральных испытаний в умеренно теплом климате с мягкой зимой (г. Геленджик) и в зоне промышленной атмосферы умеренного климата (г. Москва) после 12 мес экспозиции. После проведения экспозиций в Геленджике и Москве определены основные физико-механические характеристики. Углепластик также подвергали испытаниям по определению стойкости к климатическим факторам: термическому старению при температуре 100 °С в течение 2000 ч; тепловлажностному старению при температуре 60 °С и влажности воздуха 85 % в течение 3 мес; испытанию на тропикостойкость в течение 3 мес [27].

Установлено, что сохранение предела прочности при межслойном сдвиге образцов углепластика относительно исходных значений составляет:

- 100 % – после термического старения в течение 2000 ч при температуре испытаний 20 °С;
- более 75 % – после тепловлажностного старения при температуре 60±2 °С и относительной влажности 85±3 % после 3 мес;
- 100 % – после экспозиции тропического цикла в течение 3 мес;
- 100 % – после натуральных испытаний в умеренно теплом климате с мягкой зимой (г. Геленджик) и в зоне промышленной атмосферы умеренного климата (г. Москва) после 12 мес экспозиции.

Наблюдается вполне закономерная тенденция небольшого снижения эксплуатационных характеристик материала. Можно ожидать, что на практике, после выполнения работ по грунтовке и окраске изделия, уменьшение значений свойств будет незначительным [27].

Для получения образца углепластика сложной геометрической формы на основе объемно-армирующей плетеной преформы и последующего создания конструктивно-подобного элемента лопасти воздушного винта методом пропитки под давлением проведено моделирование процесса изготовления с учетом проницаемости армирующего наполнителя и вязкости полимерной матрицы (связующего).

С целью определения продолжительности пропитки и выбора оптимального расположения мест подачи и выхода полимерной матрицы из пресс-формы при производстве конструктивно-подобного элемента лопасти воздушного винта из углепластика

осуществлено моделирование процесса создания образца сложной геометрической формы методом пропитки под давлением. С учетом проницаемости наполнителя и вязкости полимерной матрицы проведено также моделирование процесса пропитки с использованием программы конечно-элементного моделирования PAM-RTM.

Для осуществления расчета в программе Solid Edge построена оболочечная CAD-модель конструктивно-подобного образца длиной 700 мм (рис. 4).

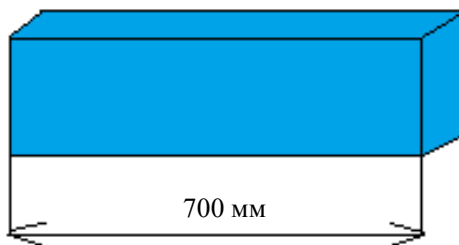


Рис. 4. Оболочечная CAD-модель конструктивно-подобного образца

Поскольку моделирование в программе PAM-RTM выполняется по методу конечных элементов, то после импорта CAD-модели в программу Visual Mesh построена FEM-модель с размером ячейки 6 мм [27].

В качестве исходных данных заданы вязкость полимерной матрицы и коэффициент проницаемости объемно-армирующей плетеной преформы:

– вязкость полимерной матрицы при температуре пропитки 50 °С изменяется в диапазоне от 0,25 до 0,45 Па·с за 150 мин;

– проницаемость армирующего наполнителя постоянная и составляет не более $1,37 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$.

Далее для проведения расчета заданы граничные условия – расположение точки подачи полимерной матрицы и точки отвода ее в ловушку. По схеме полимерная матрица подается со стороны заделки и распределяется по всей длине образца. Отвод полимерной матрицы осуществляется в противоположной части образца.

Диаметр входного и выходного штуцера одинаковый и составляет 6 мм. Давление для процесса RTM задано 0,3 МПа.

Моделирование процесса пропитки под давлением в программе PAM-RTM проводили по закону Дарси, по которому определяли расход однородной жидкости через пористую среду при ламинарном режиме потока. Основой для обеспечения закона Дарси является соблюдение закона сохранения масс с учетом несжимаемости жидкости. Параметры, оказывающие влияние на процесс пропитки, – это проницаемость наполнителя, вязкость полимерной матрицы и градиент давления. Чем больше показатель проницаемости наполнителя и скорость подачи матрицы, тем быстрее пройдет полная пропитка армирующего материала. Обратное влияние на процесс демонстрирует вязкость полимерной матрицы [27].

По результатам моделирования выявлено изменение положения фронта полимерной матрицы в зависимости от времени по предложенной схеме инъекции (рис. 5), а также установлено, что продолжительность полной пропитки конструктивно-подобного образца составила ~8000 с, что не превышает времени жизнеспособности полимерной матрицы.

Для отработки технологических режимов изготовления конструктивно-подобного элемента лопасти воздушного винта, изготовлена на фрезерно-гравировальном станке из пенопласта разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ расходоуемая оснастка. Затем методом радиального плетения на станке производства фирмы «Герцог» (Германия) наплетены слои объемно-армирующей биаксиальной преформы (рис. 6) [26].

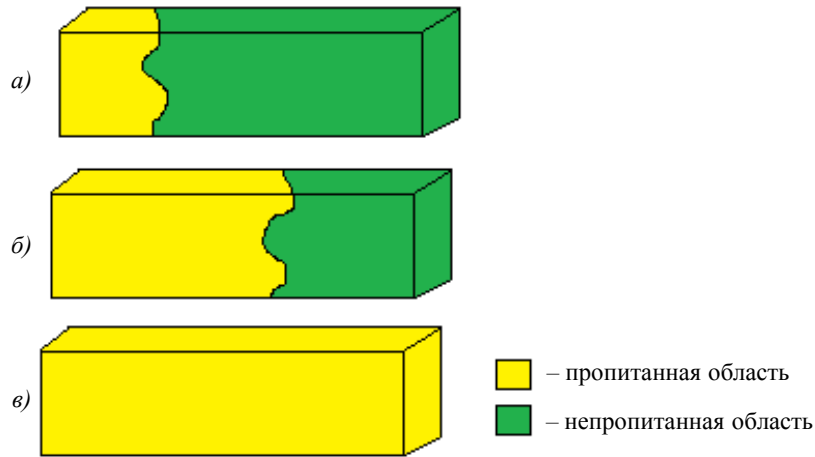


Рис. 5. Положение фронта связующего при пропитке через 650 (а) и 3100 с (б), а также при полной пропитке (в)



Рис. 6. Процесс изготовления конструктивно-подобного образца лопасти воздушного винта

Далее создан конструктивно-подобный образец лопасти воздушного винта из углепластика на основе объемно-армирующей плетеной преформы. Процесс изготовления выполнен с учетом моделирования. Осуществлен неразрушающий контроль полученного образца лопасти воздушного винта, показавший отсутствие дефектов. Проведен также рентгеновский компьютерный анализ образцов конструктивно-подобного элемента лопасти из углепластика для определения объемной доли пористости и получено значение плотности. На рис. 7 представлена визуализация образца углепластика при проведении рентгеновской компьютерной томографии.

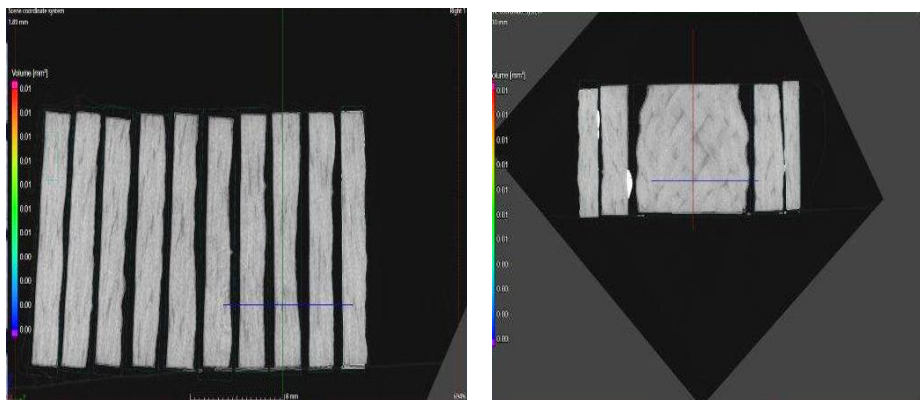


Рис. 7. Визуализация образца углепластика при проведении рентгеновской компьютерной томографии

Установлено, что пористость образца конструктивно-подобного элемента лопасти из углепластика, определенная методом рентгеновской компьютерной томографии, составляет ~0,25 %, а плотность данного образца 1,50 г/см³.

Показано, что используемая технология пропитки под давлением позволяет изготавливать высококачественный низкопористый материал. Данные, полученные в ходе работы, возможно интерпретировать применительно к созданию семейства воздушных винтов с легкими высокоресурсными лопастями из ПКМ для турбовинтовых самолетов нового поколения [2].

Заключения

Использование углепластика, создаваемого методом пропитки под давлением на основе объемно-армирующей плетеной преформы, – эффективный способ получения как материалов, так и элементов конструкций. Применение расплавной эпоксидной полимерной матрицы с пониженной температурой отверждения позволяет снизить затраты на формование изделий и получать материал с низким содержанием пор.

Такой материал является перспективным для создания конструкций сложной геометрической формы, в том числе для изготовления элемента лопасти воздушного винта. Преимущества метода пропитки под давлением связаны с пониманием как самого процесса производства, так и способа формования изделия для его практического использования. Важным является понимание закономерностей процесса и технологии создания ПКМ на основе объемно-армирующих плетеных преформ с целью получения материала с заданными свойствами. Использование данных решений в высокотехнологичных отраслях промышленности позволит создавать новые изделия для различного применения.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Список источников

1. Carey J.P. Handbook of Advances in Braided Composite Materials: Theory, Production, Testing and Applications. Elsevier Ltd, 2016. 479 p.
2. Разработка семейства воздушных винтов с легкими высокоресурсными лопастями из полимерных композиционных материалов для турбовинтовых самолетов нового поколения: отчет о работе ПАО НПП «Аэросила». 2018. URL: <http://aviationunion.ru> (дата обращения: 20.06.2022).
3. Calvert T. Braided Fabrics for Aircraft Interiors Use Carbon Reinforced PPS Tapes. 2009. URL: <https://www.reinforcedplastics.com/content/other/braided-fabrics-for-aircraft-interiors-use-carbon-reinforced-pps-tapes> (дата обращения: 28.05.2022).
4. A&P Technology, Bombardier Wing Flap. 2014. URL: <http://www.braider.com/Case-Studies/Bombardier-Wing-Flap.aspx> (дата обращения: 24.06.2022).
5. Донецкий К.И., Быстрикова Д.В., Караваев Р.Ю., Тимошков П.Н. Полимерные композиционные материалы для создания элементов трансмиссий авиационной техники (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 3 (87). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-82-93.
6. Ivey M., Carey J.P., Ayranci C. Manufacturing and characterization of braided fiber reinforced polymer rebar // Polymer Composite. 2018. Vol. 39. P. 337–350.
7. Hajihosseini A., Ayranci C., Carey J.P.R. Simulation of the rapid curing process for braided fiber reinforced rebar in braided trusion process using a finite element analysis // International SAMPE Technical Conference. Seattle; Washington, 2014. P. 2–5.
8. Del Rosso S., Iannucci L., Curtis P. Experimental Investigation of the Mechanical Properties of Dry Microbraids and Microbraid Reinforced Polymer Composites // Composite Structure. 2015. Vol. 44. P. 505–519.

9. Gnädinger F., Karcher M., Henning F. Holistic and Consistent Design Process for Hollow Structures Based on Braided Textiles and RTM // *Applied Composite Materials*. 2013. Vol. 21. P. 1–16.
10. Sun Y., Yang Y.H., He J.L. Study on Manufacture Technology and Mechanical Properties of Three Dimensional Braided Composite Support with Irregular Shape // *Advanced Material Research*. 2011. Vol. 194–196. P. 1417–1420.
11. Branscomb D., Beale D., Broughton R.M. New Directions in Braiding // *Journal of Engineered Fibers and Fabric*. 2013. Vol. 8. P. 11–24.
12. Okano M., Sugimoto K., Nakai A., Hamada H. Bending Properties of Braided Composite Tubes // *Australasian Conference on Composite Materials (ACCM 4)*. 2014. P. 218–222.
13. Потоцкий М.В., Небелов Е.В., Ткаченко Д.П., Кирпичников А.П. Подход к исследованию лопастей воздушных винтов турбовинтового двигателя, поврежденных посторонними предметами // *Вестник Казанского технологического университета*. 2012. Т. 17. № 12. С. 167–169.
14. Melenka G.W., Pastore C.M., Kij F.K. et al. Advances in 2-D and 3-D braided composite material modeling. Edmonton, 2016. P. 321–363.
15. Kablov E.N. New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2020. Vol. 90. No. 2. P. 225–228.
16. Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Раскутин А.Е., Дун В.А. Углепластик на основе объемно-армирующей триаксиальной плетеной преформы // *Труды ВИАМ*. 2019. № 1 (73). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-55-63.
17. Melenka G.W., Carey J.P., Hut A., Cheung B. Advanced testing of braided composite materials. Edmonton, 2016. P. 155–204.
18. Лопасть винта из композитного материала (варианты) и способ ее изготовления (варианты): пат. 2013109705 Рос. Федерация; заявл. 04.03.13; опубл. 20.05.14.
19. Лопасть винта летательного аппарата: пат. 2012131274 Рос. Федерация; заявл. 20.12.10; опубл. 20.11.14.
20. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // *Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т.* СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
21. *Advancements in Braided Materials Technology*. 2015. URL: <http://www.braider.com/Resources/Papers-Articles/Automated-Manufacturing.aspx> (дата обращения: 19.05.2022).
22. Samipour S.A., Khaliulin V.I., Batrakov V.V. Development of the Technology of Manufacturing Aerospace Composite Tubular Elements by Radial Braiding // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2018. Vol. 47. No. 3. P. 284–289.
23. Ivey M., Carey J.P., Ayranci C. Ply mechanics for braided composite materials. Edmonton, 2017. P. 259–306.
24. Xu L., Kim S.J., Ong Ch.-H. Prediction of material properties of biaxial and triaxial braided textile composites // *Journal of Composite Materials*. 2012. Vol. 46. P. 2255–2270.
25. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов: учеб. пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2021. 528 с.
26. Донецкий К.И., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Методы инфузии для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор). Часть 1 // *Труды ВИАМ*. 2022. № 6 (112). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-58-67.
27. Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Особенности состава полимерной матрицы и схем армирования трансмиссионных валов из полимерных композиционных материалов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2021. № 1 (95). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.05.2022). DOI: 10.18577/2307-2021-0-1-85-96.

References

1. Carey J.P. *Handbook of Advances in Braided Composite Materials: Theory, Production, Testing and Applications*. Elsevier Ltd, 2016, 479 p.
2. *Development of a family of propellers with light high-life blades made of polymer composite materials for new generation turboprop aircraft: a report on the work of PJSC NPP Aerosila*. 2018. Available at: <http://aviationunion.ru> (accessed: June 20, 2022).
3. Calvert T. *Braided Fabrics for Aircraft Interiors Use Carbon Reinforced PPS Tapes*. 2009. Available at: <https://www.reinforcedplastics.com/content/other/braided-fabrics-for-aircraft-interiors-use-carbon-reinforced-pps-tapes> (accessed: May 28, 2022).
4. *A&P Technology, Bombardier Wing Flap*. 2014. Available at: <http://www.braider.com/Case-Studies/Bombardier-Wing-Flap.aspx> (accessed: June 24, 2022).
5. Donetskii K.I., Bystrikova D.V., Karavaev R.Yu., Timoshkov P.N. Application of polymeric composite materials for creation of elements of transmissions of aviation engineering (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 3 (87), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 19, 2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-82-93.
6. Ivey M., Carey J.P., Ayranci C. Manufacturing and characterization of braidtruded fiber reinforced polymer rebar. *Polymer Composite*, 2018, vol. 39, pp. 337–350.
7. Hajihosseini A., Ayranci C., Carey J.P.R. Simulation of the rapid curing process for braid reinforced frp rebar in braidtrusion process using a finite element analysis. *Internatioanal SAMPE Technical Conference*. Seattle; Washington, 2014, pp. 2–5.
8. Del Rosso S., Iannucci L., Curtis P. Experimental Investigation of the Mechanical Properties of Dry Microbraids and Microbraid Reinforced Polymer Composites. *Composite Structure*, 2015, vol. 44, pp. 505–519.
9. Gnädinger F., Karcher M., Henning F. Holistic and Consistent Design Process for Hollow Structures Based on Braided Textiles and RTM. *Applied Composite Materials*, 2013, vol. 21, pp. 1–16.
10. Sun Y., Yang Y.H., He J.L. Study on Manufacture Technology and Mechanical Properties of Three Dimensional Braided Composite Support with Irregular Shape. *Advanced Material Research*, 2011, vol. 194–196, pp. 1417–1420.
11. Branscomb D., Beale D., Broughton R.M. New Directions in Braiding. *Journal of Engineered Fibers and Fabric*, 2013, vol. 8, pp. 11–24.
12. Okano M., Sugimoto K., Nakai A., Hamada H. Bending Properties of Braided Composite Tubes. *Australasian Conference on Composite Materials (ACCM 4)*, 2014, pp. 218–222.
13. Pototsky M.V., Nebelov E.V., Tkachenko D.P., Kirpichnikov A.P. An approach to the study of propeller blades of a turboprop engine damaged by foreign objects. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2012, vol. 17, no. 12, pp. 167–169.
14. Melenka G.W., Pastore C.M., Kj F.K. et al. *Advances in 2-D and 3-D braided composite material modeling*. Edmonton, 2016, pp. 321–363.
15. Kablov E.N. New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2020, vol. 90, no. 2, pp. 225–228.
16. Donetskii K.I., Karavayev R.Yu., Raskutin A.Ye., Dun V.A. Carbon fibers composite material on the basis of volume reinforcing triax braiding preformes. *Trudy VIAM*, 2019, no. 1 (73), paper no. 07. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: May 19, 202022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-55-63.
17. Melenka G.W., Carey J.P., Hut A., Cheung B. *Advanced testing of braided composite materials*. Edmonton, 2016, pp. 155–204.
18. *Composite propeller blade (options) and method for its manufacture (options)*: pat. 2013109705 Rus. Federation; filed 04.03.13; publ. 20.05.14.
19. *Aircraft propeller blade*: pat 2012131274 Rus. Federation; filed 20.12.10; publ. 20.11.14.
20. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Reports of XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.

21. *Advancements in Braided Materials Technology*. 2015. Available at: <http://www.braider.com/Resources/Papers-Articles/Automated-Manufacturing.aspx> (accessed: May 19, 2022).
22. Samipour S.A., Khaliulin V.I., Batrakov V.V. Development of the Technology of Manufacturing Aerospace Composite Tubular Elements by Radial Braiding. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2018, vol. 47, no. 3, pp. 284–289.
23. Ivey M., Carey J.P., Ayranci C. *Ply mechanics for braided composite materials*. Edmonton, 2017, pp. 259–306.
24. Xu L., Kim S.J., Ong Ch.-H. Prediction of material properties of biaxial and triaxial braided textile composites. *Journal of Composite Materials*, 2012, vol. 46, pp. 2255–2270.
25. Mukhametov R.R., Petrova A.P. *Thermosetting binders for polymer composite materials*: textbook. Ed. E.N. Kablov. Moscow: NRC "Kurchatov Institute" – VIAM, 2021, 528 p.
26. Donetskii K.I., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. Infusion methods for the manufacture of polymer composite materials (review). Part 1. *Trudy VIAM*, 2022, no. 6 (112). paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 19, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-58-67.
27. Goncharov V.A., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. Features of the structure and reinforcement transmission shafts made of polymer composite materials (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 1 (95), paper no. 9. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 19, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-85-96.

Информация об авторах

Донецкий Кирилл Игоревич, начальник лаборатории, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Караваев Роман Юрьевич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Быстрикова Дарья Владимировна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Грачева Алена Дмитриевна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Kirill I. Donetskii, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Roman Yu. Karavaev, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Darya V. Bystrikova, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alena D. Gracheva, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 03.08.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 09.08.2022.

The article was submitted 03.08.2022; approved and accepted for publication after reviewing 09.08.2022.