

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-112-122

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЗАГОТОВКИ ЭЛЕМЕНТА ТЯГИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕРТОЛЕТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОБЪЕМНО-АРМИРОВАННЫХ ПЛЕТЕННЫХ ПРЕФОРМ ИЗ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА

К.И. Донецкий¹, Р.Ю. Карavaев¹, Д.В. Быстрикова¹,
Д.А. Мельников¹, А.Д. Грачева¹, Н.А. Городилова¹

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

Аннотация. Разработана технология изготовления заготовки элемента тяги системы управления вертолетной техники с использованием объемно-армирующих плетеных преформ и расплавленного эпоксидного связующего российского производства. Определен оптимальный режим процесса пропитки под давлением и изготовления низкопористого материала без расслоений и дефектов в зоне «металлический закладной элемент–углепластик». Технология является перспективной для авиационной техники, судостроения, машиностроения при изготовлении сложных конструкций типа валов трансмиссии, тяг систем управления или специализированных приводов.

Ключевые слова: объемно-армирующая плетеная преформа, вакуумная инфузия, связующее, пропитка под давлением, углепластик, вал, трансмиссия

Для цитирования: Донецкий К.И., Карavaев Р.Ю., Быстрикова Д.В., Мельников Д.А., Грачева А.Д., Городилова Н.А. Изготовление заготовки элемента тяги системы управления вертолетов с применением объемно-армированных плетеных преформ из углеродного волокна // Труды ВИАМ. 2025. № 8 (150). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-112-122.

Scientific article

MANUFACTURING OF A DRAFT ELEMENT OF A HELICOPTER CONTROL SYSTEM THRUST USING VOLUME-REINFORCED WOVEN CARBON FIBER PREFORMS

K.I. Donetskiy¹, R.Yu. Karavaev¹, D.V. Bystrikova¹,
D.A. Melnikov¹, A.D. Gracheva¹, N.A. Gorodilova¹

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

Abstract. The technology for manufacturing a blank of a thrust element of a helicopter control system using volumetric-reinforcing braided preforms and a melt epoxy binder of Russian production has been developed. The optimal mode for the process of impregnation under pressure and the manufacture of a low-porosity material without delamination and defects in the zone of a metal embedded element – carbon fiber has been determined. The technology is promising for aviation, shipbuilding, mechanical engineering in the manufacture of complex structures such as transmission shafts, control system rods or specialized drives.

Keywords: volumetric reinforcing braided preform, vacuum infusion, binder, pressure impregnation, carbon fiber, shaft, transmission

For citation: Donetskiy K.I., Karavaev R.Yu., Bystrikova D.V., Melnikov D.A., Gracheva A.D., Gorodilova N.A. Manufacturing of a draft element of a helicopter control system thrust using volume-reinforced woven carbon fiber preforms. *Trudy VIAM*, 2025, no. 8 (150), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-112-122.

Введение

Вертолетостроение в СССР и Российской Федерации было и остается важнейшей задачей государственной промышленной политики в области авиастроения, соответственно разработка и производство конкурентоспособных изделий вертолетной техники являются основным приоритетом развития отрасли [1–4]. Разработка и использование новых перспективных материалов обеспечивают динамичное развитие и технологическое будущее отрасли [5–7].

Одной из задач является снижение массы используемых в вертолетостроении конструкций как минимум с сохранением, а оптимально – с повышением уровня физико-механических свойств материалов и, соответственно, изделий на их основе. Замена материалов и технологии изготовления элементов тяг управления, валов трансмиссий или иных приводов, в настоящее время часто изготавливаемых из металлических сплавов (или в лучшем случае из препрегов ручной выкладки), весьма актуальна для уже разработанных и тем более для разрабатываемых перспективных летательных аппаратов [8–13]. В качестве примера на рис. 1 приведена типовая схема размещения элементов управления вертолетом.

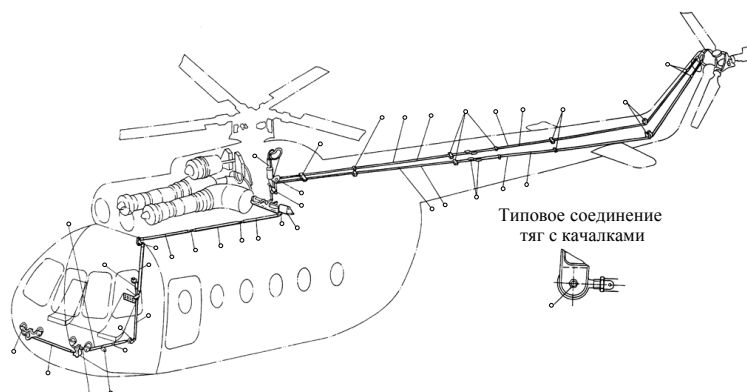


Рис. 1. Пример расположения элементов управления рулевым винтом (○) вертолета Ми-8

Тяги системы управления и аналогичные элементы состоят из трубчатого корпуса и двух законцовок, передающих осевые усилия и осевое управляющее перемещение или иное механическое движение.

Для изготовления тяг системы управления вертолетной техники в Российской Федерации часто используют металлические сплавы (иногда препреги), а за рубежом – полимерные композиционные материалы, в том числе на основе объемно-армирующих плетеных преформ, выпускаемых, например, компанией General Dynamics (США). Применение объемно-армирующих плетеных преформ позволяет за одну операцию получить конструкцию переменного сечения с заданными размерами и внедренным (при необходимости) соединительным элементом с использованием безавтоклавных технологий формования (зачастую пропитки под давлением или вакуумной инфузии).

Одним из способов изготовления трубчатых элементов конструкции является радиальное плетение, которое позволяет изготавливать армирующие преформы из практически любого волокна, такого как углеродное, стеклянное, базальтовое, органическое, и проектировать изделия с необходимым конструктору набором характеристик и, соответственно, потребительским диапазоном свойств. Применение пропитки низковязким расплавленным связующим совместно с технологией плетения обеспечивает получение низкопористого высокопрочного материала. Использование полимерных композиционных материалов на основе объемно-армирующих плетеных преформ при изготовлении тяг системы управления вертолетной техники позволяет уменьшить массу

изделий по сравнению с металлическими сплавами, сократить производственный цикл и снизить долю ручного труда за счет автоматизации процесса производства [14–19]. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработана технология изготовления заготовки элемента тяги системы управления вертолетной техники путем пропитки под давлением объемно-армирующей плетеной преформы из российского углеродного волокна расплавленным эпоксидным связующим отечественного производства.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбрана заготовка элемента тяги системы управления вертолетной техники на основе объемно-армированной плетеной преформы из углеродного волокна марки Umatex с углом армирования $\pm(45\pm 2)$ градусов (биаксиальное плетение) и связующего марки ВСЭ-62 разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, изготавливаемая методом пропитки под давлением (совместная пропитка с металлическим закладным элементом). Схема укладки волокна в биаксиальной преформе представлена на рис. 2.



Рис. 2. Биаксиальное плетение волокна

Важным этапом разработки технологии изготовления любого изделия из полимерных композиционных материалов является оптимальный выбор связующего, который отвечает всем аспектам технологии и позволит получить материал с необходимым набором свойств [20–23]. Из научно-технических литературных источников известно принципиальное влияние связующего на свойства получаемого полимерного материала, такие как прочность, тепло- и влагостойкость, стойкость к действию агрессивных сред и др. Связующее должно обеспечивать совместную работу армирующих волокон и образовывать непрерывно-наполненный материал, в котором матрица сохраняет структуру вплоть до разрушения волокна. Исключительно важным свойством связующего является технологичность применительно к конкретным технологическим процессам изготовления материалов, в частности полимерных композиционных.

В качестве такого связующего выбрано высокопрочное эпоксидное связующее расплавленного типа марки ВСЭ-62, позволяющее успешно проводить пропитку под давлением плетеной преформы. Свойства эпоксидного связующего марки ВСЭ-62:

Кажущаяся вязкость по Брукфильду, Па·с (не более), при температуре, °С:	
100±1	0,03
120±1 (после изотермической выдержки связующего при 120±1 °С в течение 2 ч)	0,045
Сохранение вязкости связующего при температуре переработки 100 °С, ч	6,5
Температура стеклования, °С (не менее)	165
Время гелеобразования при температуре 160±2 °С, мин	88

Необходимо отметить, что по вязкостным характеристикам указанное связующее можно успешно перерабатывать методами пропитки под давлением и вакуумной инфузии. Кроме того, следует обратить внимание на значительное время сохранения вязкости связующего (жизнеспособность) при температуре переработки ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$), которое составляет 6,5 ч, что позволяет при необходимости повторно его использовать после нагрева в процессе пропитки волокнистого наполнителя (рис. 3) [20].

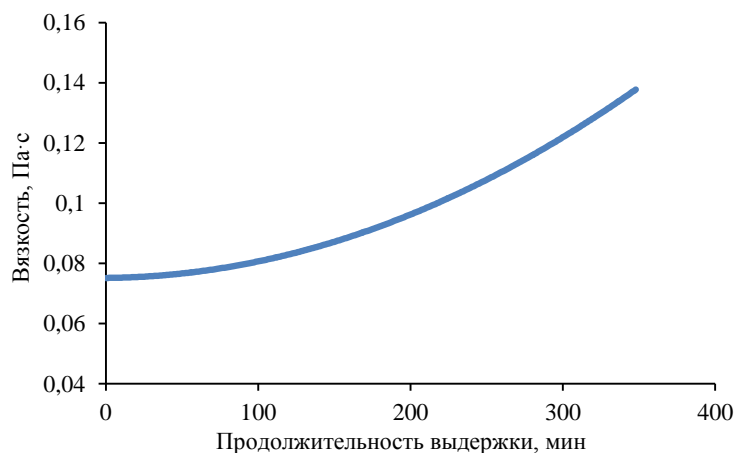


Рис. 3. Зависимость кажущейся вязкости связующего от продолжительности изотермической выдержки при температуре $100\text{ }^{\circ}\text{C}$

Пропитка объемно-армированной плетеной преформы выполняется при температуре $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, при которой вязкость связующего составляет $0,035\text{ Па}\cdot\text{с}$.

Заготовки элемента тяги системы управления, входящего в состав колонки несущего винта, представляют собой сборку из углепластикового цилиндра, изготовленного на основе плетеной преформы, и металлических закладных элементов (законцовок) (рис. 4).

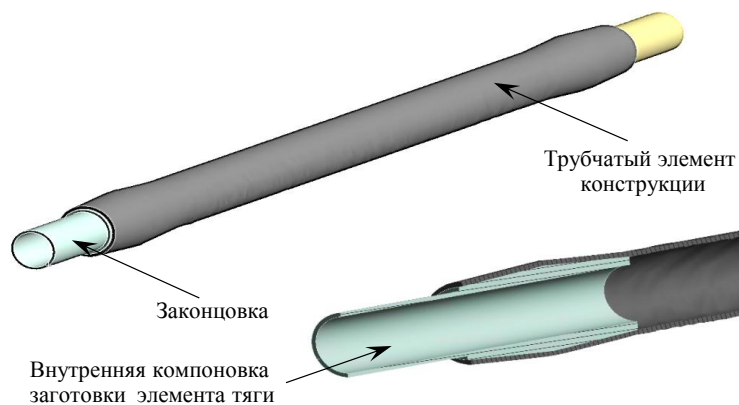


Рис. 4. Общий вид заготовки элемента тяги системы управления

Для получения плетеной преформы изготавливается специализированная оснастка, представляющая собой цилиндр необходимого диаметра и длины, выполненный из склеенных пенопласта и металлических законцовок.

В качестве материала для оснастки выбран пеноакрилимид марки ВПП-5 разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, который рекомендован в качестве легкого заполнителя для получения изделий сложной формы конструкционного назначения. Возможна также его обработка на токарном станке для достижения высокого качества

обрабатываемой поверхности и прочности изготавливаемой оснастки. Пеноакрилимид марки ВПП-5 может эксплуатироваться в интервале температур от -60 до $+150$ °С (при температуре 180 °С – до 50 ч), что является принципиальным для процесса отверждения расплавленного эпоксидного связующего при температуре 180 °С. В процессе отверждения связующего не происходит видимых изменений структуры пенопластовой сердцевины оснастки.

На рис. 5 представлены эскизы изготовленных металлических закладных элементов и оснастки из пеноакрилимидов.

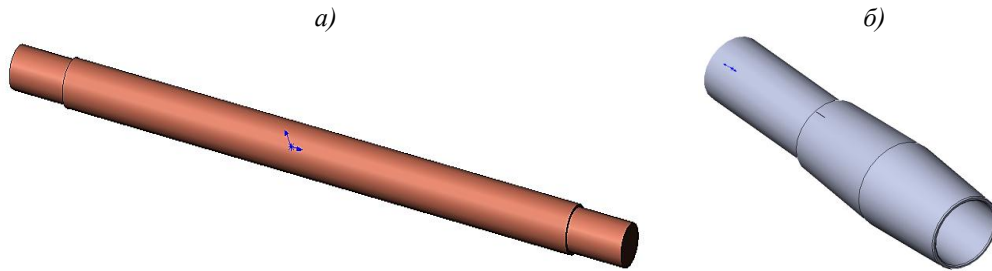


Рис. 5. Эскизы пенопластовой оснастки (а) и закладного элемента (б) для заготовки элемента тяги системы управления

На токарно-винторезном станке изготовлены металлические закладные элементы необходимого размера (рис. 6).



Рис. 6. Изготовление металлических закладных элементов

Необходимо отметить, что поверхность металлических закладных элементов, которая должна контактировать с объемно-армирующей плетеной преформой, дополнительно обработана на пескоструйном станке для повышения адгезии слоя «металл–углепластик».

На рис. 7 представлены стадии изготовления фрагментов цилиндрических оснасток из пенопласта и оснасток в сборе.

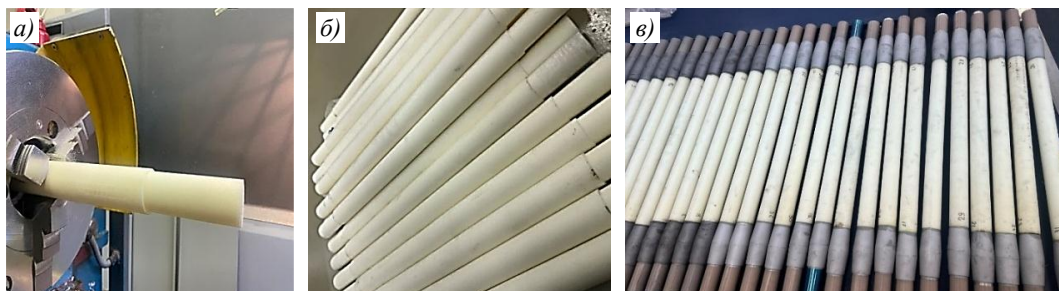


Рис. 7. Производство фрагмента оснастки из пеноакрилимидов (а, б) и изготовленные оснастки заготовки элемента тяги системы управления (в)

Следующей ответственной стадией изготовления заготовки элемента тяги системы управления является оплетка полученных оснасток углеродным волокном с биаксиальной схемой укладки на станке радиального плетения (рис. 8).



Рис. 8. Процесс оплетения оснастки с металлическими закладными элементами для изготовления заготовки элемента тяги системы управления углеродным волокном

Как видно на рис. 8, углеродное волокно оплетает оснастку без пропусков и «соскальзывания» оплетки по всей длине. «Сдвижек» плетеной преформы с металлических закладных элементов также не происходило.

Результаты и обсуждение

Разработана и изготовлена специализированная оснастка для проведения пропитки под давлением плетеной преформы выбранным связующим (рис. 9). Необходимо было достичь определенного баланса между качественной поверхностью изготавливаемой детали, полностью покрытой впрыскиваемым связующим, и отсутствием его избытка как в углепластике, так и в оснастке. Избыток связующего отрицательно влияет на механические свойства изделия.

На рис. 10 приведено изображение изготовленных заготовок элементов тяги системы управления.

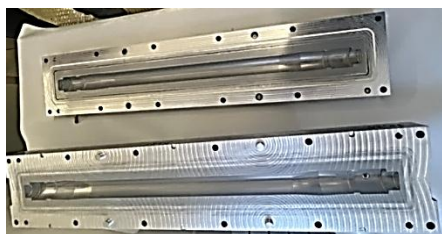


Рис. 9. Специализированная оснастка, предназначенная для изготовления заготовок элемента тяги системы управления пропиткой под давлением

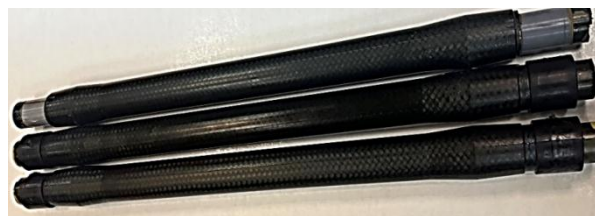


Рис. 10. Заготовки элемента тяги системы управления вертолетной техники

В процессе исследования технологических режимов изготовления заготовки элемента тяги системы управления методом пропитки под давлением с использованием объемно-армирующей плетеной преформы из углеродного волокна связующим марки ВСЭ-62 варьировали и оптимизировали следующие основные параметры технологических режимов:

- температура и продолжительность сушки плетеной преформы перед проведением пропитки с целью удаления влаги, образующейся при ее изготовлении;
- вакуумное давление в пресс-форме – не менее 0,060 МПа;
- продолжительность пропитки под действием вакуумного давления в пресс-форме – не менее 5 мин;

- избыточное давление при проведении пропитки – не менее 0,1 МПа;
- количество шагов избыточного давления – не менее 2;
- продолжительность выдержки каждого шага избыточного давления – не менее 2 мин;
- температурно-временной режим отверждения.

Подбор оптимальных значений указанных параметров позволил разработать технологию изготовления заготовки элемента тяги системы управления. На рис. 11 приведено изображение разреза изделия, наглядно показывающее его внутреннюю структуру: пенопластовый наполнитель, пропитанная плетеная преформа и металлический закладной элемент.



Рис. 11. Внутренняя структура заготовки элемента тяги управления

Критически важными для длительной и успешной эксплуатации изделия являются структура зоны перехода «металл закладного элемента–углепластик», отсутствие расслоений и внутренних дефектов, пористость материала, что в дальнейшем определяет жизнеспособность конструкции [24, 25]. Исследована микроструктура (рис. 12) зоны соединения металлического закладного элемента (наконечника) с углепластиком (с использованием видеоизмерительного микроскопа) и зоны цилиндрического основания заготовки – образцов из углепластика (с использованием метода рентгеновской компьютерной томографии).

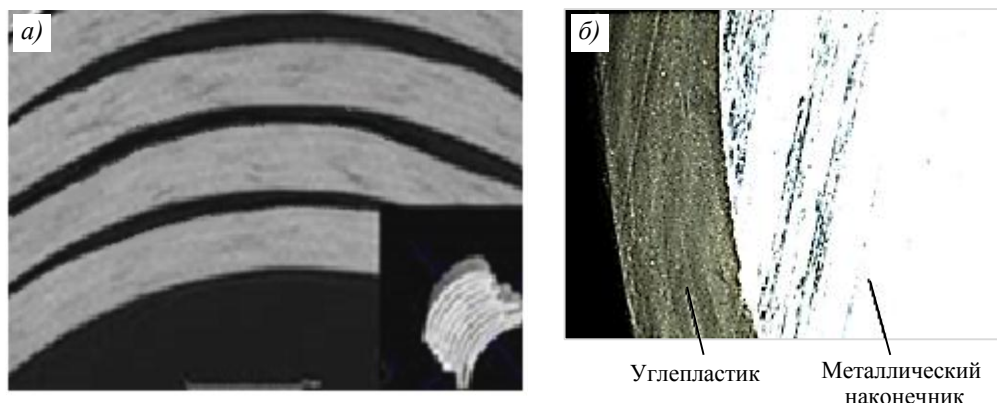


Рис. 12. Визуализация микроструктур образцов из углепластика, вырезанных из заготовки (а), и зоны соединения металлического наконечника и углепластика (б)

Исследование микроструктуры образцов наглядно показало отсутствие дефектов, расслоений и пустот в структуре образцов, в том числе в зоне совмещения «металл–углепластик». Основные свойства образцов из заготовки элемента тяги системы управления:

5. 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.
6. Irving P.E., Soutis C. *Polymer composites in the aerospace industry*. Sawston, Cambridge: Woodhead Publishing, 2019. 536 p.
7. Башаров Е.А., Вагин А.Ю. Анализ применения композиционных материалов в конструкции планеров вертолетов // *Труды МАИ*. 2017. № 92. С. 1–33.
8. Liang R., Xu F., Zou Z. et al. Mechanical properties analysis and experimental study of double-lap mechanically connected carbon fiber drive shafts // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2024. Vol. 46. P. 467. DOI: 10.1007/s40430-024-05049-9.
9. Raushan R., Dhande K.K., Jamadar N.I. Modal analysis of carbon fiber reinforced polyamide 66 drive shaft using analytical and finite element approach // *The International Journal on Interactive Design and Manufacturing*. 2025. Vol. 19. P. 2801–2816. DOI: 10.1007/s12008-024-01854-7.
10. Carbon fiber drive shaft: pat. US4089190A; appl. 14.04.76; publ. 16.05.78.
11. Трансмиссия вертолета // Avia.pro: информационное агентство. URL: <http://avia.pro/blog/transmissiya-vertoleta> (дата обращения: 10.06.2025).
12. Тимошков П.Н., Хрульков А.В., Григорьева Л.Н. Трансмиссионные валы из углепластика. *Материалы и технологии (обзор)* // *Труды ВИАМ*. 2020. № 8 (90). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.06.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-46-53.
13. Composite tube for torque and/or load transmissions and related methods: pat. US 2014221110, appl. 05.02.14, publ. 07.08.14.
14. Carey J.P. *Handbook of Advances in Braided Composite Materials: Theory, Production, Testing and Application*. Woodhead Publishing; Elsevier, 2017. P. 3–6.
15. Белинис П.Г., Донецкий К.И., Лукьяненко Ю.В., Рогожников В.Н., Майер Ю., Быстрикова Д.В. Объемно-армирующие цельнотканые преформы для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 4 (57). С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-18-26.
16. 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.
17. Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Раскутин А.Е., Панина Н.Н. Свойства угле- и стеклопластиков на основе плетеных преформ // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. № 4 (45). С. 54–59. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-54-59.
18. 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: 11.06.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-58-67.
19. Мишкин С.И., Жакова Л.С., Клименко О.Н., Васильчук Е.А. Исследование влияния содержания связующего в углепластиках на их механические свойства // *Труды ВИАМ*. 2023. № 2 (120). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.06.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-77-86.
20. Панина Н.Н., Ким М.А., Гуревич Я.М., Григорьев М.М., Чурсова Л.В., Бабин А.Н. Связующие для безавтоклавного формования изделий из полимерных композиционных материалов // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2013. № 10. С. 18–27.
21. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 3 (56). С. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
22. Resin composition, a fiber reinforced material having a partially impregnated resin and composites made therefrom: pat. US6139942; appl. 06.02.97; publ. 31.10.00.
23. Varvani-Farahani A. Composite materials: characterization, fabrication and application-research challenges and directions // *Applied Composite Materials*. 2010. Vol. 17. Is. 2. P. 63–67.
24. Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Быстрикова Д.В., Мишун М.И. Свойства углепластика на основе биаксиальной объемно-армирующей плетеной преформы для изготовления элементов трубчатых конструкций // *Конструкции из композиционных материалов*. 2022. № 2 (166). С. 8–14.

25. 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: 15.06.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-85-96.

References

1. 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.
2. Onishchenko G.G., Kablov E.N., Ivanov V.V. Scientific and technological development of Russia in the context of achieving national goals: problems and solutions. *Innovatsii*, 2020, no. 6 (260), pp. 3–16.
3. Kablov E.N., Antipov V.V. The role of new generation materials in ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.
4. Mikhailin Yu.A. *Fibrous polymer composite materials in engineering*. St. Petersburg: Scientific foundations and technologies, 2013, 720 p.
5. Raskutin A.E. Russian polymer composite materials of new generation, their exploitation and implementation in advanced developed constructions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
6. Irving P.E., Soutis C. *Polymer composites in the aerospace industry*. Sawston, Cambridge: Woodhead Publishing, 2019, 536 p.
7. Basharov E.A., Vagin A.Yu. Analysis of the use of composite materials in the design of helicopter airframes. *Trudy MAI*, 2017, no. 92, pp. 1–33.
8. Liang R., Xu F., Zou Z. et al. Mechanical properties analysis and experimental study of double-lap mechanically connected carbon fiber drive shafts. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2024, vol. 46, p. 467. DOI: 10.1007/s40430-024-05049-9.
9. Raushan R., Dhande K.K., Jamadar N.I. Modal analysis of carbon fiber reinforced polyamide 66 drive shaft using analytical and finite element approach. *The International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 2025, vol. 19, pp. 2801–2816. DOI: 10.1007/s12008-024-01854-7.
10. *Carbon fiber drive shaft*: pat. US4089190A; appl. 14.04.76; publ. 16.05.78.
11. Helicopter transmission. Avia.pro: information agency. Available at: <http://avia.pro/blog/transmissiya-vertoleta> (accessed: June 10, 2025).
12. Timoshkov P.N., Hruikov A.V., Grigoreva L.N. Carbon fiber transmission shaft. Materials and technology (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 8 (90), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 11, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-46-53.
13. *Composite tube for torque and/or load transmissions and related methods*: pat. US 2014221110, appl. 05.02.14, publ. 07.08.14.
14. Carey J.P. *Handbook of Advances in Braided Composite Materials: Theory, Production, Testing and Application*. Woodhead Publishing; Elsevier, 2017, pp. 3–6.
15. Belinis P.G., Donetskii K.I., Lukyanenko Yu.V., Rogozhnikov V.N., Mayer Yu., Bystrikova D.V. Volume reinforcing solid-woven preforms for manufacturing of polymer composite materials (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-18-26.
16. Dushin M.I., Hruikov A.V., Muhametov R.R., Chursova L.V. Features of manufacturing of products from PCM impregnation method under pressure. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 1, pp. 18–26.
17. Doneckiy K.I., Karavaev R.Yu., Raskutin A.E., Panina N.N. Properties of carbon fiber and fiberglass on the basis of braiding preforms. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2016, no. 4 (45), pp. 54–59. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-54-59.
18. Donetskii K.I., Usacheva M.N., Hruikov 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: June 11, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-58-67.

19. Mishkin S.I., Zhakova L.S., Klimenko O.N., Vasilchuk E.A. Research of influence of the contents resin in CFRP on their mechanical properties. *Trudy VIAM*, 2023, no. 2 (120), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 12, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-2-77-86.
20. Panina N.N., Kim M.A., Gurevich Ya.M., Grigoriev M.M., Chursova L.V., Babin A.N. Binders for non-autoclave molding of products from polymer composite materials. *Klei. Germetiki. Tehnologii*, 2013, no. 10, pp. 18–27.
21. Mukhametov R.R., Petrova A.P. Thermosetting binders for polymer composites (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
22. *Resin composition, a fiber reinforced material having a partially impregnated resin and composites made therefrom*: pat. US6139942; appl. 06.02.97; publ. 31.10.00.
23. Varvani-Farahani A. Composite materials: characterization, fabrication and application-research challenges and directions. *Applied Composite Materials*, 2010, vol. 17, is. 2, pp. 63–67.
24. Donetskii K.I., Karavaev R.Yu., Bystrikova D.V., Mishchun M.I. Properties of carbon fiber based on a biaxial volumetric-reinforcing woven preform for the manufacture of tubular structure elements. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov*, 2022, no. 2 (166), pp. 8–14.
25. 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: June 15, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-85-96.

Информация об авторах

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

Караваяв Роман Юрьевич, заместитель начальника лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Мельников Денис Александрович, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Городилова Наталья Александровна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

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

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

Denis A. Melnikov, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Natalia A. Gorodilova, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 10.07.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 11.07.2025.

The article was submitted 10.07.2025; approved and accepted for publication after reviewing 11.07.2025.