

---

Научная статья

УДК 678.747.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-49-57

## СРАВНЕНИЕ ОНЛАЙН- И ОФЛАЙН-ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРЕПРЕГОВ И СВОЙСТВ УГЛЕПЛАСТИКОВ

И.Н. Гуляев<sup>1</sup>, А.М. Сафронов<sup>1</sup>, Р.А. Сатдинов<sup>1</sup>

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

**Аннотация.** Проведено сравнение технологических свойств препрегов, произведенных по онлайн- и офлайн-технологиям, а также физико-механических свойств углепластиков марок ВКУ-29/ВТКУ-3 и ВКУ-39/ВТКУ-2.200 на основе расплавленного связующего ВСЭ-1212. Оценены преимущества и недостатки рассматриваемых технологий изготовления препрегов и их влияние на свойства углепластиков. Показано, что различие в технологии получения полуфабрикатов (препрегов) не оказывает влияния на конечные свойства углепластиков, изготовленных автоклавным формованием.

**Ключевые слова:** полимерный композиционный материал, углепластик, препрег, расплавленное связующее, технология изготовления ПКМ, конструкционные свойства ПКМ

**Для цитирования:** Гуляев И.Н., Сафронов А.М., Сатдинов Р.А. Сравнение онлайн- и офлайн-технологий изготовления препрегов и свойств углепластиков // Труды ВИАМ. 2022. № 6 (112). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-49-57.

Scientific article

## COMPARISON ONLINE AND OFFLINE OF PREPREGS MANUFACTURING TECHNOLOGIES AND PROPERTIES OF CARBON FIBER PLASTICS

I.N. Gulyaev<sup>1</sup>, A.M. Safronov<sup>1</sup>, R.A. Satdinov<sup>1</sup>

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

**Abstract.** A comparison of the technological properties of prepregs produced by online and offline technologies and the physical and mechanical properties of carbon fiber plastics based on a molten epoxy highly deformative binder is carried out. The advantages and disadvantages of the considered prepreg manufacturing technologies and their influence on the properties of carbon fiber plastics are evaluated. It is shown that the difference in the technology of obtaining semi-finished products (prepregs) does not affect the obtaining of the final properties of carbon fiber plastics obtained by autoclave molding.

**Keywords:** polymer composite material, carbon fiber plastics, prepreg, molten epoxy binder, technologies manufacturing PCM, structural properties PCM

**For citation:** Gulyaev I.N., Safronov A.M., Satdinov R.A. Comparison online and offline of prepregs manufacturing technologies and properties of carbon fiber plastics. *Trudy VIAM*, 2022, no. 6 (112), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-49-57.

### Введение

В настоящее время во всех отраслях промышленности, в том числе и в авиационной, наблюдается увеличение спроса на полимерные композиционные материалы

(ПКМ), в которых комплекс высоких прочностных, диэлектрических и теплофизических характеристик хорошо сочетается с экономической эффективностью их использования. Современные ПКМ изготавливают на основе различных наполнителей: стеклопластики – на основе стеклянных, органопластики – на основе арамидных, углепластики – на основе углеродных. Новейшие ПКМ отвечают все возрастающим требованиям к уровню упруго-прочностных характеристик и эксплуатационной стабильности, обеспечивающих работоспособность конструкций, и современным экологическим требованиям к технологиям переработки [1–5].

Ранее для изготовления препрегов использовали растворную технологию, т. е. пропитку осуществляли путем протяжки армирующего наполнителя через раствор связующего в легко удаляемых растворителях типа ацетона или спирто-ацетоновой смеси с последующим их удалением в сушильной камере. При этом в атмосферу выбрасывалось большое количество вредных веществ. Несмотря на сушку при повышенной температуре, в препрегах, изготовленных по растворной технологии, содержится значительное количество летучих веществ, наличие которых при условии их неудаления в процессе формования может привести к существенным отклонениям от регламентируемых физико-механических свойств в ПКМ. Наличие летучих веществ в составе препрега затрудняет определение массовой доли связующего в процессе пропитки, что приводит к существенному его отклонению от заданного содержания. Кроме того, использование растворной технологии изготовления препрегов делает невозможным применение в составе связующих термопластичных добавок и модификаторов, что также негативно сказывается на деформационных свойствах ПКМ и стойкости их к растрескиванию [6–10].

Применение расплавных связующих при изготовлении препрегов позволяет избежать указанных недостатков. Полимерное связующее в расплавленном состоянии путем каландрования совмещается с армирующим наполнителем непосредственно в пропиточной машине. При этом расплав практически не содержит летучих веществ. Содержание связующего можно регулировать зазорами между валками пропиточных машин, на которых изготавливают препреги, что обеспечивает снижение разброса по содержанию связующего в препреге в пределах  $\pm 2\%$ . Отсутствие растворителя и равномерность нанесения связующего положительно влияют на свойства материалов при изготовлении в дальнейшем изделий из ПКМ. Кроме того, по указанной технологии можно изготавливать препреги на основе однонаправленных жгутов, что невозможно сделать при использовании растворных пропиточных машин [11–15].

Создание ПКМ нового поколения требует решения ряда задач: от разработки термостойких связующих, позволяющих создавать ПКМ с повышенной (до 400 °С) рабочей температурой, и производства современных волокнистых стеклянных и углеродных тканых наполнителей различной текстильной формы, обеспечивающих получение требуемых прочностных характеристик, до разработки технологии их совмещения для получения полуфабриката и/или формирования композиционных материалов [16].

Расширение области применения ПКМ и увеличение объемов их потребления требуют совершенствования технологий изготовления препрегов, в том числе направленного на сокращение времени их производства, при этом обеспечивая получение полуфабрикатов со стабильными свойствами, что в конечном итоге должно привести к снижению стоимости готовых изделий [17].

Производство препрегов по расплавной технологии осуществляется как непрерывно при одновременном изготовлении пленки связующего и совмещении в каландрах (онлайн-технология), так и в отдельных процессах формирования пленки связующего на отдельном узле нанесения пленок (коутере) и последующего совмещения ее в пропиточной машине с армирующим наполнителем (офлайн-технология).

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [18, 19].

### Материалы и методы

В работе исследованы препреги на основе эпоксидного связующего марки ВСЭ-1212 и углеродных тканей (однонаправленной ткани марки ВТкУ-3 с поверхностной плотностью  $200 \text{ г/м}^2$ , из углеродного жгута 12К, с линейной плотностью 800 текс и равнопрочной ткани марки ВТкУ-2.200 с поверхностной плотностью  $200 \text{ г/м}^2$ , из углеродного жгута 3К, с линейной плотностью 198 текс, изготовленных по онлайн- и офлайн-технологиям), а также углепластики из этих препрегов марок ВКУ-29/ВТкУ-3 и ВКУ-39/ВТкУ-2.200.

При анализе препрегов углепластиков марок ВКУ-29/ВТкУ-3 и ВКУ-39/ВТкУ-2.200 на соответствие требованиям технических условий определяли массовую долю связующего (по ASTM D 3529M) и поверхностную плотность (по ASTM D 3776).

При исследовании свойств углепластиков определяли пределы прочности и модули упругости при растяжении и изгибе, а также предел прочности при сжатии.

Изготовление углепластиков, полученных из препрегов по онлайн- и офлайн-технологиям, проводили в автоклаве по стандартному режиму с конечной температурой формования  $180 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### Результаты и обсуждение

Процессы получения препрегов при онлайн- и офлайн-технологиях достаточно схожие, однако имеют ряд отличий и ограничений. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ (далее – ВИАМ) изготовление препрегов осуществляют по обеим технологиям, также проводится работа по их сравнению. Препреги углепластиков марок ВКУ-29/ВТкУ-3 и ВКУ-39/ВТкУ-2.200 изготавливали по двум технологиям.

Изготовление препрегов по онлайн-технологии осуществляли на пропиточной установке (рис. 1), разработанной по техническому заданию ВИАМ для получения каландрированных препрегов по расплавной технологии из жгутов 1К-24К (безуточные препреги) шириной 100–600 мм, а также углеродных лент и тканей шириной до 1200 мм.

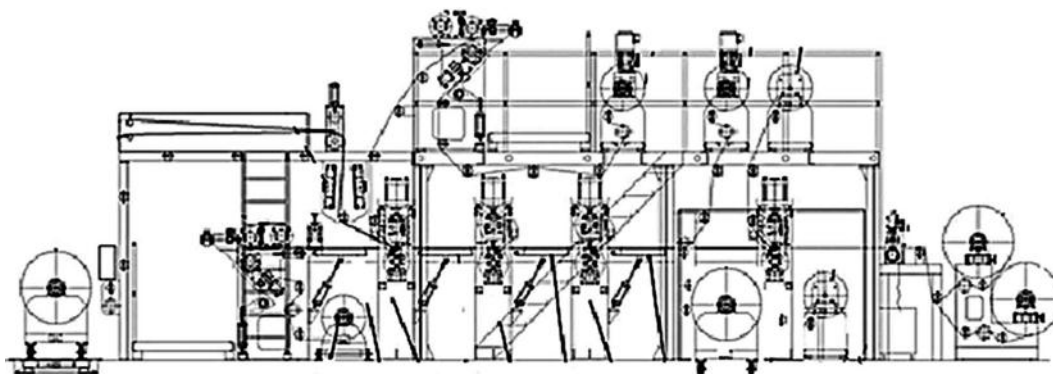


Рис. 1. Схема пропиточной установки для изготовления препрегов по онлайн-технологии

Данный процесс проводят на пропиточных машинах с односторонним, но чаще с двусторонним нанесением связующего на армирующий наполнитель. При этом полимерное связующее переводится в расплав на коутерах и наносится либо на антиадгезионную подложку, с которой в дальнейшем при каландрировании переносится на армирующий наполнитель, либо непосредственно на наполнитель.

Использование онлайн-технологии позволяет работать со связующими на основе низкодеформативных полимеров, например таких, как полиимиды, поскольку совмещение с наполнителем происходит непосредственно с низковязким расплавом. При нанесении же на подложку пленки низкодеформативных связующих остывают, становятся хрупкими и осыпаются с нее – именно по этой причине с такими связующими затруднительно или невозможно работать по офлайн-технологии. Онлайн-технология позволяет непрерывно производить большие партии препрегов, при этом необходимо постоянно поддерживать требуемое количество разогретого связующего на коутерах.

При изготовлении препрегов углепластиков марок ВКУ-29/ВТкУ-3 и ВКУ-39/ВТкУ-2.200 связующее наносилось на антиадгезионную подложку, а затем дублировалось с армирующим наполнителем. В процессе подготовки к пропитке для обеспечения требуемого наноса связующего производится отработка технологических параметров (зазоры в узлах нанесения, соотношение скоростей наносящих валов, позволяющих правильно выбрать способ переноса пленки связующего с наносящего вала на подложку и скорость линии) получения пленки связующего заданных весовых характеристик, что требует дополнительного расхода материалов. Однако в процессе пропитки пленка связующего может менять свои весовые характеристики, а соответственно, будет меняться нанос связующего в препреге. При изготовлении препрега по онлайн-технологии необходим постоянный контроль процесса пропитки с регулярным отбором проб как по ширине, так и по длине полотна. При неудовлетворительных показателях проб корректировка параметров получения пленки и регулирование наноса связующего осуществляются непосредственно в процессе пропитки. Это может приводить к большому разбросу значений по массовой доле связующего и поверхностной плотности как по ширине, так и по длине изготавливаемого препрега. При нанесении связующего на армирующий наполнитель определение наноса связующего осуществляется непосредственно в процессе пропитки, что является причиной еще большего отклонения от средних значений свойств препрега и увеличивает количество технологических вырезок, приводящих к его отходам. При селективном отборе препрегов по массовой доле связующего в соответствии с техническими условиями на материал часть препрегов с большим или меньшим содержанием связующего отбраковывается, что также приводит к увеличению отходов и повышает стоимость их производства.

Избежать этого возможно за счет применения сложных и дорогостоящих автоматизированных систем бесконтактного контроля поверхностной плотности пленки связующего, имеющих обратную связь с системой его нанесения для обеспечения непрерывного контроля содержания связующего в препреге.

Изготовление препрегов по офлайн-технологии осуществляли на установке для производства препрегов на основе расплавных связующих (рис. 2), также разработанной по техническому заданию ВИАМ.

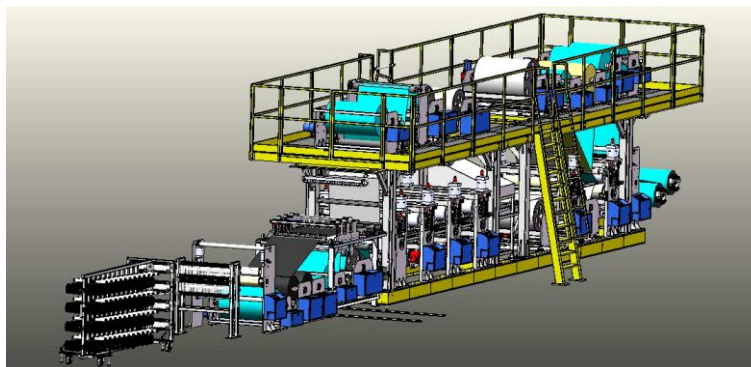


Рис. 2. Схема пропиточной установки для изготовления препрегов по офлайн-технологии

При изготовлении препрега по офлайн-технологии пленка связующего производится в отдельном процессе, при котором исходя из весовых характеристик наполнителя и требуемого содержания связующего определяются ее весовые параметры, позволяющие получать препрег с заданным содержанием связующего. В процессе производства пленки связующего возможно осуществлять контроль за изменением ее весовых параметров и осуществлять их оперативное регулирование, что способствует получению размеростабильной по длине и ширине пленки связующего. В свою очередь это позволяет изготавливать препреги с минимальным разбросом значений по массовой доле связующего. Непосредственный контроль в процессе производства пленки связующего способствует существенному сокращению количества технологических вырезов для анализа препрега в процессе пропитки и приводит к снижению расхода армирующего наполнителя.

Армирующие наполнители имеют различные показатели поверхностной плотности. Например, поверхностная плотность углеродных тканей ВТкУ-3 и ВТкУ-2.200 может составлять  $200 \pm 10$  г/м<sup>2</sup>. Таким образом, один рулон ткани может отличаться от другого по весовым характеристикам. А при изготовлении препрегов по офлайн-технологии возможно изготовление пленок связующего с различной массой, которые при совмещении могут обеспечивать требуемую величину наноса с учетом различных значений массы армирующего наполнителя, что в свою очередь окажет положительное влияние на равномерность получаемого препрега и пластика на его основе.

К недостаткам офлайн-технологии можно отнести то, что не все классы связующих способны перерабатываться с образованием пластичной пленки или сохранять непрерывность слоя после охлаждения (с высокой усадкой).

Исследования проводили для препрегов углепластиков марок ВКУ-29/ВТкУ-3 и ВКУ-39/ВТкУ-2.200 и углепластиков на их основе.

В табл. 1 приведены сравнительные результаты исследования свойств указанных препрегов, изготовленных по двум технологиям.

Таблица 1

**Свойства препрегов углепластиков марок ВКУ-29/ВТкУ-3 и ВКУ-39/ВТкУ-2.200, изготовленных по двум технологиям**

Препрег	Значения свойств* препрега					
	с массовой долей связующего, % (по массе)			с поверхностной плотностью, г/м <sup>2</sup>		
	по требованиям ТУ	изготовленного по технологии		по требованиям ТУ	изготовленного по технологии	
		онлайн	офлайн		онлайн	офлайн
ВКУ-29/ВТкУ-3	36±4	$\frac{33-39}{36}$	$\frac{33-37}{35}$	279-350	$\frac{297-328}{310}$	$\frac{294-313}{305}$
ВКУ-39/ВТкУ-2.200	36±4	$\frac{33-39}{36}$	$\frac{34-36}{35}$	279-350	$\frac{299-328}{310}$	$\frac{300-314}{310}$

\* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

Анализ свойств препрегов, изготовленных по двум технологиям, свидетельствует о том, что отклонение от среднего значения по массовой доле связующего в препрегах, изготовленных по офлайн-технологии, меньше ( $\pm(1-2)$  %), чем у препрегов, полученных по онлайн-технологии ( $\pm 3$  %), что обеспечивает меньший диапазон значений свойств и более стабильный уровень показателей массовой доли связующего и их поверхностной плотности.

В дальнейшем из препрегов, полученных по онлайн- и офлайн-технологиям, изготовили углепластики, применяя одинаковый стандартный режим формования в автоклаве.

В табл. 2 и 3 приведены сравнительные результаты исследования свойств углепластиков марок ВКУ-39/ВТкУ-2.200 и ВКУ-29/ВТкУ-3, полученных из препрегов по двум технологиям.

*Таблица 2*

**Свойства углепластиков марки ВКУ-29/ВТкУ-3,  
изготовленных из препрегов по двум технологиям**

Свойства	Значения свойств углепластиков, изготовленных по технологии	
	онлайн	офлайн
Толщина монослоя, мм	0,19	0,19
Массовая доля связующего, % (по массе)	34–37	34–36
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,58–1,60	1,58–1,59
Предел прочности при растяжении вдоль волокна, МПа	2300–2500	2300–2450
Модуль упругости при растяжении вдоль волокна, ГПа	130–140	125–130
Предел прочности при сжатии, МПа	1200–1400	1000–1200
Предел прочности при изгибе, МПа	1500–1700	1750–2300
Модуль упругости при изгибе, ГПа	110–125	105–110

*Таблица 3*

**Свойства углепластиков марки ВКУ-39/ВТкУ-2.200,  
изготовленных из препрегов по двум технологиям**

Свойства	Значения свойств углепластиков, изготовленных по технологии	
	онлайн	офлайн
Толщина монослоя, мм	0,19–0,20	0,20
Массовая доля связующего, % (по массе)	34–37	34–37
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,56–1,58	1,58–1,59
Предел прочности при растяжении вдоль волокна, МПа	850–1050	800–950
Модуль упругости при растяжении вдоль волокна, ГПа	60–65	60–65
Предел прочности при сжатии, МПа	760–860	750–850
Предел прочности при изгибе, МПа	1050–1200	1000–1050
Модуль упругости при изгибе, ГПа	58–60	55–57

По полученным результатам видно, что свойства углепластиков марок ВКУ-29/ВТкУ-3 и ВКУ-39/ВТкУ-2.200, полученных из препрегов по рассматриваемым технологиям, имеют близкие значения, при этом уровень значений свойств пластиков, получаемых из препрегов по офлайн-технологии, несколько меньше.

Анализ свойств препрегов, изготовленных по различным технологиям, и углепластиков на их основе позволяет сделать вывод о взаимозаменяемости способов изготовления препрегов углепластиков марок ВКУ-29/ВТкУ-3 и ВКУ-39/ВТкУ-2.200.

### Заключения

Проведено изготовление препрегов углепластиков марок ВКУ-39/ВТкУ-2.200 и ВКУ-29/ВТкУ-3 по онлайн- и офлайн-технологиям. Выполнена оценка технологических характеристик изготовленных препрегов.

Результаты исследования показали, что отклонение от среднего значения по массовой доле связующего в препрегах, полученных по офлайн-технологии, меньше ( $\pm(1-2)\%$ ), чем у препрегов, полученных по онлайн-технологии ( $\pm 3\%$ ), что в дальнейшем при изготовлении углепластиков позволит обеспечить более стабильные значения массовой доли связующего и поверхностной плотности препрега.

Из препрегов, полученных по онлайн- и офлайн-технологиям, изготовлены углепластики по одинаковому стандартному режиму формования в автоклаве и исследованы их основные свойства. Показано, что свойства углепластиков, полученных из препрегов по рассматриваемым технологиям, сопоставимы и различия в технологии изготовления препрегов не влияют на конечные свойства материалов, что позволяет сделать вывод о взаимозаменяемости способов производства препрегов углепластиков марок ВКУ-29/ВТкУ-3 и ВКУ-39/ВТкУ-2.200.

### Благодарность

Авторы выражают благодарность ведущему инженеру-технологу И.В. Зелениной за помощь в подготовке статьи.

### Список источников

1. Каблов Е.Н. Маркетинг материаловедения, авиастроения и промышленности: настоящее и будущее // Директор по маркетингу и сбыту. 2017. № 5–6. С. 40–44.
2. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
3. 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.
4. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
5. Каблов Е.Н. Для освоения космоса нужны новые материалы // Научная Россия. URL: <https://scientificrussia.ru/interviews/akademik-e-n-kablov-dlya-osvoeniya-kosmosa-nuzhny-novye-materialy> (дата обращения: 10.12.2021).
6. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3. С. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
7. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / под ред. А.А. Берлина. 3-е изд., испр. и доп. СПб.: Профессия, 2011. 556 с.
8. Kaushik V., Raghavan J. Experimental study of tool-part interaction during autoclave processing of thermoset polymer composite structures // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. 2010. Vol. 41. No. 9. P. 1210–1218.
9. Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р. Выбор технологических параметров автоклавного формования деталей из полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2011. № 3. С. 20–26.
10. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Развитие автоматизированной выкладки от истоков до наших дней (обзор). Часть 1. Автоматизированная выкладка лент (ATL) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 2 (63). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 19.12.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-51-61.

11. Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Мухаметов Р.Р., Панина Н.Н. Разработки ФГУП «ВИАМ» в области расплавных связующих для полимерных композиционных материалов // Полимерные материалы и технологии. 2016. Т. 2. № 2. С. 37–42.
12. Донецкий К.И., Коган Д.И., Хрульков А.В. Использование принципов «зеленой химии» в перспективных технологиях изготовления изделий из ПКМ // Композитный мир. 2013. № 5. С. 34–38.
13. Эпоксидное связующее, препрег на его основе и изделие, выполненное из него: пат. RU 2012137431А; заявл. 03.09.12; опубл. 10.03.14.
14. Kablov E.N., Chursova L.V., Lukina N.F., Kutsevich K.E., Rubtsova E.V., Petrova A.P. A Study of Epoxide-Polysulfone Polymer Systems for High-Strength Adhesives of Aviation Purpose // Polymer Science. Series D. 2017. Vol. 10. No. 3. P. 225–229.
15. Гуляева А.Г., Сидорина А.И., Курносов А.О., Клименко О.Н. Полимерные композиционные материалы нового поколения на основе связующего ВСЭ-1212 и наполнителей, альтернативных наполнителям фирм Porcher Ind. и Toho Tenax // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3 (52). С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.
16. Железняк В.Г., Мухаметов Р.Р., Чурсова Л.В. Исследование возможности создания термореактивного связующего на рабочую температуру до 400 °С // Авиационные материалы и технологии. 2013. № S2. С. 58–61.
17. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
18. 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.
19. Гращенков Д.В. Стратегия развития неметаллических материалов, металлических композиционных материалов и теплозащиты // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.

#### References

1. Kablov E.N. Marketing of materials science, aircraft building and industry: present and future. *Direktor po marketingu i sbytu*, 2017, no. 5–6, pp. 40–44.
2. Kablov E.N. VIAM: new generation materials for PD-14. *Krylya Rodiny*, 2019, no. 7–8, pp. 54–58.
3. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Reports XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
4. Kablov E.N. Materials of a new generation and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
5. Kablov E.N. New materials are needed for space exploration. *Nauchnaya Rossiya*. Available at: <https://scientificrussia.ru/interviews/akademik-e-n-kablov-dlya-osvoeniya-kosmosa-nuzhny-novye-materialy> (accessed: December 10, 2021).
6. 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.
7. Kerber M.L., Vinogradov V.M., Golovkin G.S. et al. *Polymer composite materials: structure, properties, technology*: textbook. 3rd ed., rev. and add. St. Petersburg: Profession, 2011, 556 p.
8. Kaushik V., Raghavan J. Experimental study of tool–part interaction during autoclave processing of thermoset polymer composite structures. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2010, vol. 41, no. 9, pp. 1210–1218.
9. Dushin M.I., Hruikov A.V., Muhametov R.R. A choice of technological parameters of autoclave formation of details from polymeric composite materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2011, no. 3, pp. 20–26.

10. Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. The development of automated laying: from the beginning to our days (review). Part 1. Automated Tape Laying (ATL). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 19, 2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-51-61.
11. Kablov E.N., Chursova L.V., Babin A.N., Mukhametov R.R., Panina N.N. Developments of FSUE "VIAM" in the field of melt binders for polymer composite materials. *Polimernye materialy i tekhnologii*, 2016, vol. 2, no. 2, pp. 37–42.
12. Donetsk K.I., Kogan D.I., Khrulkov A.V. Using the principles of "green chemistry" in promising technologies for the manufacture of products from PCM. *Kompozitnyy mir*, 2013, no. 5, pp. 34–38.
13. *Epoxy binder, prepreg based on it and a product made from it*: pat. RU 2012137431A; filed 03.09.12; publ. 10.03.14.
14. Kablov E.N., Chursova L.V., Lukina N.F., Kutsevich K.E., Rubtsova E.V., Petrova A.P. A Study of Epoxide-Polysulfone Polymer Systems for High-Strength Adhesives of Aviation Purpose. *Polymer Science. Series D*, 2017, vol. 10, no. 3, pp. 225–229.
15. Gunyaeva A.G., Sidorina A.I., Kurnosov A.O., Klimenko O.N. Polymeric composite materials of new generation on the basis of binder VSE-1212 and the filling agents alternative to ones of Porcher Ind. and Toho Tenax. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2018, no. 3 (52), pp. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.
16. Zheleznyak V.G., Muhametov R.R., Chursova L.V. Study of possibility of thermoset binder creation for operating temperature up to 400 °C. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2013, no. S2, pp. 58–61.
17. Raskutin A.E. Development strategy of polymer composite materials. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2017, no. S, pp. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
18. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
19. Grashchenkov D.V. Strategy of development of non-metallic materials, metal composite materials and heat-shielding. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2017, no. S, pp. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.

#### Информация об авторах

**Гуляев Иван Николаевич**, заместитель начальника лаборатории по науке, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Сафронов Андрей Михайлович**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Сатдинов Руслан Амиржанович**, заместитель начальника УНТЦ по производству, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

#### Information about the authors

**Ivan N. Gulyaev**, Deputy Head of Laboratory of Science, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Andrey M. Safronov**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Ruslan A. Satdinov**, Deputy Head of USTC for production, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 14.04.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 21.04.2022.  
The article was submitted 14.04.2022; approved and accepted for publication after reviewing 21.04.2022.