

Научная статья

УДК 541.64:539.24

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-55-65

## СТРУКТУРА И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОРГАНОПЛАСТИКА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТКАНИ ИЗ АРАМИДНОГО ВОЛОКНА МАРКИ РУСАР-НТ И РАСПЛАВНОГО СВЯЗУЮЩЕГО

Г.С. Кулагина<sup>1</sup>, Г.Ф. Железина<sup>1</sup>, П.М. Шульдешова<sup>1</sup>, Е.В. Куршев<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.** Рассмотрена и проанализирована микроструктура органопластика (органотекстолита) на основе арамидной ткани, выполненной из волокна третьего поколения марки Русар-НТ, и расплавно-эпоксидного связующего, модифицированного термопластом – полисульфоном. Определены физико-механические свойства органопластика. Установлено, что исследуемый органопластик по своим прочностным характеристикам и водостойкости превосходит своих предшественников – органопластики на основе арамидных волокон первого и второго поколений.

**Ключевые слова:** арамидное волокно Русар-НТ, арамидная ткань, расплавно-эпоксидное связующее, микроструктура, физико-механические свойства

**Для цитирования:** Кулагина Г.С., Железина Г.Ф., Шульдешова П.М., Куршев Е.В. Структура и физико-механические свойства органопластика нового поколения на основе ткани из арамидного волокна марки Русар-НТ и расплавно-эпоксидного связующего // Труды ВИАМ. 2022. № 10 (116). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-55-65.

Scientific article

## STRUCTURE AND PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF A NEW GENERATION ORGANOPLASTIC BASED ON RUSAR-NT BRAND ARAMID FIBER FABRIC AND MELT BINDER

G.S. Kulagina<sup>1</sup>, G.F. Zhelezina<sup>1</sup>, P.M. Shuldeshova<sup>1</sup>, E.V. Kurshev<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.** Considered and analyzes the microstructure of an organoplastic (organotextolite) based on an aramid fabric, made from a third-generation fiber of the Rusar-NT brand, and a melted epoxy binder modified with a thermoplastic – polysulfone. The physico-mechanical properties of organoplastics are determined. It has been established that the studied organoplastic in terms of its strength characteristics and water resistance surpasses its predecessors – organoplastics based on aramid fibers of the first and second generation.

**Keywords:** aramid fiber Rusar-NT, aramid fabric, melt binder, microstructure, physical and mechanical properties

**For citation:** Kulagina G.S., Zhelezina G.F., Shuldeshova P.M., Kurshev E.V. Structure and physical-mechanical properties of a new generation organoplastic based on Rusar-NT brand aramid fiber fabric and melt binder. *Trudy VIAM*, 2022, no. 10 (116), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-55-65.

### Введение

Органопластики на основе высокопрочных арамидных волокон относятся к классу конструкционных полимерных композиционных материалов (ПКМ). Среди ПКМ авиационного назначения они являются самыми легкими и предназначены для изготовления конструкций, подвергающихся интенсивным виброакустическим, эрозийным и ударным воздействиям. Арамидные органопластики способны сохранять высокий уровень прочности конструкции даже при наличии локальных механических повреждений, могут использоваться как самостоятельные материалы, так и в составе гибридных конструкций в сочетании с другими композитами (например, стекло- или углепластиками) [1–11] или металлическими сплавами [12, 13].

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработаны и внедрены в авиационную промышленность органопластики марок Органит 10Т, Органит 11ТЛ, Органит 12Т(М)-Рус, ВКО-19, ВКО-2ТБ, ВКО-20 и др. [1, 10]. Эти материалы имеют в своем составе тканый армирующий наполнитель различной текстильной структуры из арамидных волокон первого (торговая марка СВМ) и второго поколений (торговая марка Руслан).

Совершенствование свойств арамидных органопластиков с целью повышения их эксплуатационных характеристик и устойчивости к воздействию воды и влаги осуществляется за счет применения высокопрочных, устойчивых к влаге арамидных волокон третьего поколения (торговая марка Русар-НТ), а также расплавных связующих для получения препрегов органопластиков, позволяющих по сравнению с растворным связующим обеспечить равномерность наноса при изготовлении препрега и снизить пористость и дефектность полимерной матрицы в композиционном материале [14, 15]. Волокно Русар-НТ имеет нейтральную реакцию водной вытяжки сразу после изготовления и не требует дополнительной операции по нейтрализации. Прочность нити в микропластике составляет 5000–6000 МПа, модуль упругости 160–175 ГПа [16].

Ранее был разработан новый однонаправленный органопластик марки ВКО-24 на основе жгута с линейной плотностью 600 текс из нитей Русар-НТ (58,8 текс) и расплавного эпоксидного связующего. Однонаправленный органопластик изготовлен методом выкладки препрега и обладает следующими характеристиками: плотность 1,38 г/см<sup>3</sup>, прочность при растяжении 2060 МПа, модуль упругости 101 ГПа, водопоглощение 1,1 %. В работе [17] проведены исследования микроструктуры органопластика, выявлены особенности формирования структуры полимерной матрицы в процессе отверждения связующего в присутствии арамидного наполнителя с высокоэнергетической поверхностью, установлен характер разрушения волокон и полимерной матрицы при одноосном растяжении материала.

В данной работе представлен органопластик (органотекстолит) марки ВКО-25, в состав которого входят армирующий наполнитель – ткань из волокна Русар-НТ, а также расплавное эпоксидное связующее в качестве полимерной матрицы, представляющее собой многокомпонентную систему, включающую термопласт (полисульфон).

Цель данной работы – исследование структуры и определение физико-механических свойств органопластика.

### Материалы и методы

Для изготовления органопластика применяли армирующий наполнитель – ткань на основе нейтрального арамидного волокна марки Русар-НТ. Ткань выполнена из комплексной нити линейной плотности 14,3 текс, переплетение – атлас 3/2. Свойства арамидного наполнителя приведены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства ткани на основе арамидного волокна Русар-НТ

Свойства	Средние значения свойств
Линейная плотность комплексной нити, текс	14,3
Поверхностная плотность ткани, г/м <sup>2</sup>	92,8
Количество нитей на 10 см:	
основа	301
уток	281
Разрывная нагрузка полоски ткани размером 50×200 мм, Н:	
основа	2880
уток	4120
Удлинение при разрыве полоски ткани размером 50×200 мм, %:	
основа	4,1
уток	2,8

В качестве полимерного связующего в данной работе использовано расплавное связующее, представляющее собой композицию из эпоксидных олигомеров и модификатора – полисульфона. Свойства связующего представлены в табл. 2.

Таблица 2

Свойства расплавного связующего

Свойства	Средние значения свойств
Кажущаяся вязкость по Брукфильду, Па·с, при температуре 70±1 °С	87,3
Время гелеобразования по гелтаймеру, мин, связующего при температуре 110±2 °С	48
Температура стеклования отвержденного связующего, °С	157

Препрег органопластика изготавливали путем пропитки наполнителя (арамидной ткани) расплавом связующего на пропиточной установке. Предварительно армирующий наполнитель в виде рулонов сушили в термошкафу при температуре 100 °С в течение 6 ч.

Формование плит органопластиков проводили в автоклаве при максимальной температуре 140 °С и давлении 0,6 МПа. Сборку пакета для формования осуществляли послойной выкладкой заготовок препрега размером 300×300 мм в 10 слоев с укладкой 0 градусов вдоль направления волокна. Образцы органопластика для испытаний изготавливали из отформованных плит на отрезном станке с водяным охлаждением.

Температуру стеклования определяли методом динамического механического анализа (ДМА). Реакционную способность связующего определяли методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) при динамическом нагреве со скоростью 10 °С/мин в воздушной среде.

Физико-механические испытания образцов органопластика на растяжение проводили согласно ГОСТ Р 56785–2015. Определение упруго-прочностных свойств при изгибе осуществляли по ГОСТ Р 56810–2015. Ударную вязкость по Шарпи определяли с помощью маятникового копра для образцов без надреза в соответствии с ГОСТ 4647–2015.

Физические свойства образцов органопластика определяли в соответствии со следующей нормативной документацией: по ГОСТ 15139–69 плотность, по ММ 1.2.039–2005 – толщину монослоя, по ГОСТ 4650–80 – водопоглощение.

Для выявления микроструктуры образцы органопластика расслаивали между слоями и исследовали две поверхности. Образцы подвергали ионно-плазменному

травлению в течение 20 мин, затем с помощью вакуумной установки для магнетронного напыления наносили слой золота толщиной 20 нм.

Исследование микроструктуры проводили методом сканирующей электронной микроскопии в режиме вторичных электронов по методике, описанной в работах [18, 19].

Лабораторные климатические испытания по определению стойкости органопластика к действию влаги (влагопоглощение) при температуре  $23 \pm 2$  °С и относительной влажности 98 % проводили по ГОСТ 12020–2018, а при температуре 60 °С и влажности 85 % – по ГОСТ 9.707–81.

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

### Результаты и обсуждение

Препрег для изготовления органопластика на основе армирующего тканого наполнителя из арамидного волокна Русар-НТ и расплавного эпоксидно-полисульфонового связующего характеризуется следующими свойствами: поверхностная плотность препрега составляет  $187 \text{ г/м}^2$ , массовая доля связующего 47 %. По данным ДСК показано, что при нагреве со скоростью  $10 \text{ °С/мин}$  активная реакция отверждения связующего начинается с температуры  $\sim 140 \text{ °С}$  как в составе препрега, так и в исходном состоянии. Тепловой эффект реакции отверждения связующего в исходном состоянии и в препреге ( $\Delta H$ ) составляет  $\sim 430 \text{ Дж/г}$  (из расчета на 100%-ное содержание связующего). Исходя из этого можно предположить, что присутствие арамидного наполнителя не оказывает влияния на реакционную способность эпоксидных олигомеров в составе связующего.

Образцы органопластика, изготовленные автоклавным формованием из препрега (10 слоев), имеют содержание связующего 45–47 % (по массе). Толщина монослоя составляет 0,12 мм, плотность органопластика  $1350 \text{ кг/м}^3$ .

Получены и проанализированы микрофотографии структуры двух поверхностей расслоения органопластика: одна поверхность содержит преимущественно полимерную матрицу, вторая – наполнитель. На рис. 1 представлены микрофотографии исследуемых поверхностей расслоения. Диаметр волокон, входящих в структуру тканого наполнителя в органопластике, составляет 15 мкм.

По своей химической природе волокно Русар-НТ представляет ароматический сополиамид, синтезируемый из следующих мономеров: дихлорангидрида терефталевой кислоты, диаминобензимидазола, хлор-*n*-фенилендиамина. Надмолекулярная структура полимера в волокне представляет собой выстроенные вдоль оси волокна кристаллические фибриллярные образования. Микроструктура поверхности исходного волокна Русар-НТ описана в работе [17]. Показано, что поверхность волокна преимущественно гладкая, однако присутствуют дефектные области в виде микротрещин и отслаивания микрофибрилл. Отмечено, что структура поверхностного слоя волокна отличается от его внутренней структуры. В работе [20] показано, что волокно Русар-НТ характеризуется довольно высоким значением полярной составляющей поверхностной энергии, что предполагает его хорошую смачиваемость эпоксидными олигомерами.

На микрофотографиях (рис. 1) видно, что в процессе расслоения органопластика происходит разрушение по границе раздела «волокно–матрица» и полимерной матрицы в прослойках между волокнами. Кроме того, видно, что в поверхностном слое арамидных волокон наблюдается отщепление микрофибриллярных структур и их вырывание. Это свидетельствует о формировании межфазного слоя особой структуры на границе раздела «арамидное волокно–полимерная матрица», образованного, по-видимому, за счет сил межмолекулярного взаимодействия на поверхности раздела фаз, а также

адсорбции и диффузии частей макромолекул связующего внутрь структуры волокна в областях дефектов поверхностного слоя.

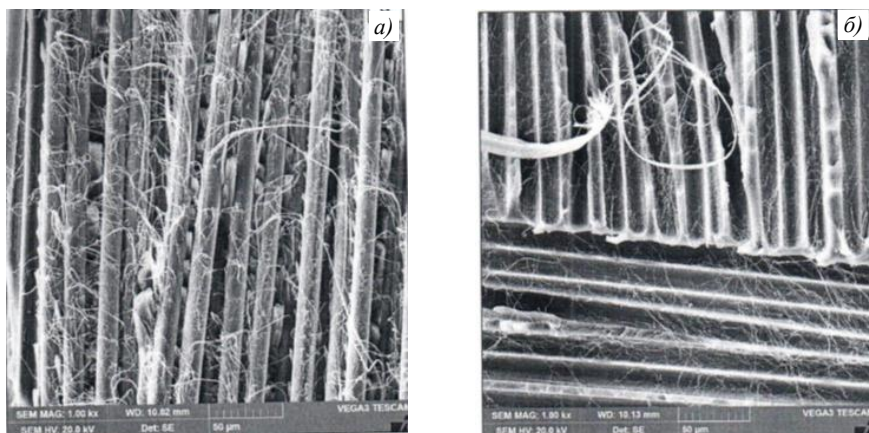


Рис. 1. Микрофотографии поверхностей расслоения образца органопластика на основе ткани Русар-НТ с преимущественным содержанием арамидного наполнителя (а) и полимерной матрицы (б)

На рис. 2 более четко при большем увеличении показана структура прослоек полимерной матрицы, расположенной между волокнами. На микрофотографиях видно, что полимерная матрица имеет включения сферической формы. Более детально ее структура изображена на рис. 3. Объемная доля дисперсной фазы составляет ~5 %.

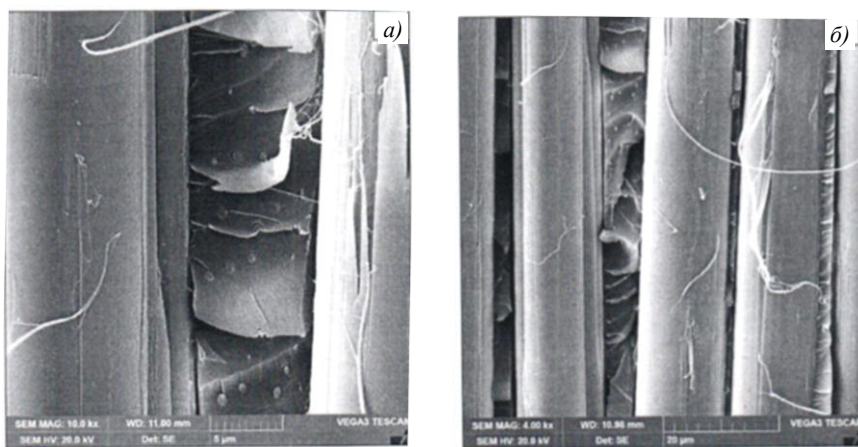


Рис. 2. Микрофотографии поверхности расслоения образца органопластика на основе ткани Русар-НТ при различном увеличении

На основании научно-технических литературных данных, касающихся поведения смесей эпоксидных олигомеров и термопластов, можно констатировать, что структурообразование в таких системах основано на фазовых превращениях, вызванных химическими реакциями в отверждающейся композиции. В результате реакций отверждения эпоксидных компонентов в полимерной системе происходят изменения, выраженные в увеличении молекулярной массы реакционноспособных полимеров и образовании пространственной сетки химических связей, что приводит к изменению фазового состояния исходной композиции. Механизм структурообразования будет определяться термодинамическими характеристиками системы, а также трансляционной подвижностью

макромолекул термопласта, растворенного в эпоксидном олигомере и в пространственно-сшитом эпоксидном полимере на разных стадиях химической реакции отверждения [21, 22].

В данном случае анализ микрофотографий полимерной матрицы показал (рис. 3), что процесс отверждения многокомпонентной эпоксидной композиции, включающей полисульфон, характеризуется фазовым распадом с образованием дисперсных частиц размером от 0,2 до 3,5 мкм и вторичным фазовым распадом. Такая картина свойственна для множества систем, содержащих эпоксидный полимер и термопласт [23–26].

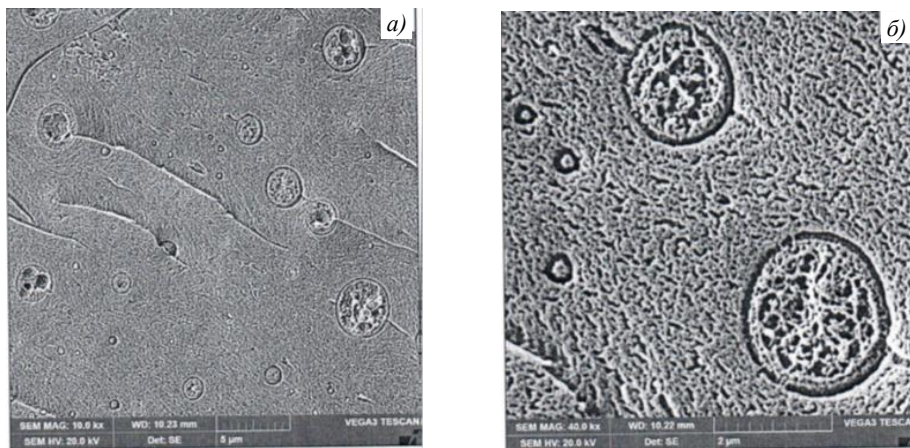


Рис. 3. Микрофотографии структуры полимерной матрицы образца органопластика на основе ткани Русар-НТ при различном увеличении

Таким образом, можно видеть, что полимерная матрица в отвержденном состоянии в составе органопластика характеризуется двухфазной структурой, свойственной эпоксидным полимерам, модифицированным термопластами или каучуками. Состав, фазовая структура полимерной матрицы, уровень ее адгезии на границе раздела фаз «арамидный наполнитель–полимерная матрица» и взаимодействие с наполнителем будут определять физико-механические свойства материала. Следует ожидать, что присутствие термопластичного модификатора и малый размер дисперсных включений в структуре полимерной матрицы позволят выявить положительное влияние такой модификации на ее механические свойства. Температура стеклования полимерной матрицы в составе органопластика составляет 157 °С.

В данной работе определены физико-механические свойства органопластика на основе ткани Русар-НТ (прочность при растяжении и изгибе, ударная вязкость). Испытания проводили при температурах 20 и 80 °С. Результаты приведены в табл. 3. Видно, что механические свойства (прочность при растяжении и изгибе, ударная вязкость) имеют высокие значения для арамидных органопластиков [10]. Сравнение характеристик образцов органопластика при температуре 80 °С по сравнению со значениями, полученными при 20 °С, показало сохранение прочности при растяжении более 90 %; сохранение прочности при изгибе – на уровне 80 %. Это связано с тем, что при испытаниях на изгиб полимерная матрица оказывает больший вклад по сравнению с испытаниями на растяжение, в которых определяющее значение имеет арамидный наполнитель. Ударная вязкость при температуре 20 °С составляет 250 кДж/м<sup>2</sup>.

Для прогнозирования возможности применения органопластика в составе элементов конструкций изделий, эксплуатирующихся в условиях с повышенной влажностью, проведены исследования по оценке влагопоглощения органопластика

и изменения прочности при растяжении под воздействием тепла и влаги в камерах повышенной влажности (98 %), тепловлажностного старения (при температуре 60 °С и влажности 85 %) и при выдерживании в воде.

Таблица 3

**Физико-механические свойства органопластика на основе ткани Русар-НТ**

Свойства	Средние значения свойств
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1350
Толщина монослоя, мм	0,12
Предел прочности при растяжении, МПа, при температуре испытания, °С:	
20	915
80	835
Модуль упругости при растяжении, ГПа, при температуре испытания, °С:	
20	41
80	37
Прочность при изгибе, МПа, при температуре испытания, °С:	
20	555
80	445
Модуль упругости при изгибе, ГПа, при температуре испытания, °С:	
20	30
80	24
Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м <sup>2</sup> , образцов без надреза при 20 °С	250

Показано, что водопоглощение после выдерживания в воде в течение 90 сут составило 1,07 %, после экспозиции в условиях 98%-ной влажности – 0,55 %, после камеры тепловлажностного старения – 1,25 %. Эти значения свидетельствуют о высоком уровне влагостойкости, сравнимой с влагостойкостью угле- и стеклопластиков. Для аналога исследуемого материала – органопластика на основе клеевой пленки и тканого наполнителя той же структуры, но на основе волокна второго поколения (Руслан) – водопоглощение после выдерживания в воде в течение 90 сут составило 1,5 %, что также не является критичным, так как органопластик показывает хорошее сохранение свойств после воздействия тепла и влаги (не менее 80 %).

Исследовано влияние воздействия тепла и влаги на свойства органопластика при растяжении. Известно, что совместное воздействие воды и тепла может оказывать серьезное влияние на прочностные свойства полимерного композита. В табл. 4 приведены результаты физико-механических испытаний образцов органопластика при растяжении. Видно, что экспозиции образцов органопластика в условиях выдерживания в воде, а также в тепловлажностной камере при температуре 60 °С и относительной влажности 85 % в течение 3 мес не привели к значительным изменениям прочностных свойств – установлено сохранение прочности при растяжении на уровне 95 %. При этом следует отметить, что органопластик в условиях экспозиции находился в виде уже нарезанных из плиты образцов с незащищенными торцами.

Таблица 4

**Физико-механические свойства органопластика после экспозиции в тепловлажностных условиях**

Свойства	Температура испытания, °С	Средние значения свойств в условиях тепловлажностного старения в течение, мес		
		1	2	3
Предел прочности при растяжении ( $\sigma_b$ ), МПа	20	900	900	885
	80	845	825	810
Модуль упругости при растяжении ( $E$ ), ГПа	20	40	–	38
	80	37	–	32

Результаты проведенных исследований показали, что разработанный органопластик может быть рекомендован для изготовления элементов конструкции современной и перспективной авиационной и другой техники, работающей в условиях повышенной влажности.

### Заключения

В данной работе методом сканирующей электронной микроскопии выявлена микроструктура нового органопластика на основе арамидной ткани из волокна третьего поколения Русар-НТ и расплавного эпоксидно-полисульфонового связующего. Изучена микроструктура двух поверхностей расслоения – обогащенных полимерным связующим и арамидным наполнителем. Установлено, что полимерная матрица имеет гетерогенную структуру со сферическими фазовыми включениями и характеризуется вторичным фазовым распадом. Показано наличие межфазного слоя особой структуры, формирующегося вблизи высокоэнергетической поверхности арамидного волокна.

Установлено также, что исследуемый органопластик на основе арамидного волокна третьего поколения Русар-НТ по сравнению с аналогом – органопластиком на основе арамидного наполнителя второго поколения – обладает более высокими физико-механическими свойствами (более чем на 10 %) и более низким водопоглощением (не менее чем на 20 %).

По сравнению с органопластиком на основе арамидного наполнителя аналогичной структуры ткани из волокон второго поколения, для которого характерна прочность при растяжении 820 МПа, модуль упругости при растяжении 33,9 ГПа, прочность при изгибе 505 МПа, ударная вязкость 190 кДж/м<sup>2</sup> [10], для органопластика на основе арамидного волокна третьего поколения Русар-НТ установлено преимущество по физико-механическим свойствам не менее чем на 10 %.

Показано, что воздействие тепла и влаги (температура 60 °С и относительная влажность 85 %) на образцы исследуемого органопластика в течение 3 мес позволяет сохранить высокий уровень прочности при растяжении: ~95 %.

### Список источников

1. Авиационные материалы: справочник в 13 т. / под ред. Е.Н. Каблова. 7-е изд., доп. и перераб. М.: ВИАМ, 2015. Т. 7: Полимерные композиционные материалы. 209 с.
2. Zhang S., Zhao D. *Advances in materials science and engineering. Aerospace materials handbook*. CRC Press. Taylor & Francis Group, 2012. 781 p.
3. Singh A.K., Wanhill R.J.H., Prasad N.E. *Lightweight ballistic armours for aero-vehicle protection // Aerospace materials and material technologies*. 2017. Vol. 2: Aerospace material technologies. P. 541–567.
4. Справочник по композиционным материалам / под ред. Дж. Любина. М.: Машиностроитель, 1988. Кн. 1. 448 с.
5. Каблов Е.Н. *Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии*. 2012. № 3. С. 10–15.
6. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-64-76.
7. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 7–17.
8. Колобков А.С. Полимерные композиционные материалы для различных конструкций авиационной техники (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2020. № 6–7 (89). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44.

9. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. СПб.: Научные основы и технологии, 2013. 822 с.
10. Железина Г.Ф., Гуляев И.Н., Соловьева Н.А. Арамидные органопластики нового поколения для авиационных конструкций // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 368–378. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-368-378.
11. Roberts G.D., Revilock D.M., Binienda W.K. et al. Impact Testing and Analysis of Composites for Aircraft Engine Fan Cases // Journal of Aerospace Engineering. 2002. No. 15. P. 104–110.
12. Железина Г.Ф., Соловьева Н.А., Кулагина Г.С., Шульдешова П.М. Исследование возможности повышения стойкости к удару тонколистовых углепластиков за счет плакирования арамидным органопластиком // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 18.05.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-35-42.
13. Laurens B.V. Development of a new hybrid material (ARALL) for aircraft structures // Industrial & Engineering Chemistry. 1983. No. 22 (3). P. 492–496.
14. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2021. 528 с.
15. Петрова А.П., Мухаметов Р.Р., Шишимиров М.В., Павлюк Б.Ф., Старостина И.В. Методы испытаний и исследований термореактивных связующих для полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 12 (72). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-62-70.
16. Железина Г.Ф., Войнов С.И., Черных Т.Е., Черных К.Ю. Новые арамидные волокна Русар-НТ для армирования конструкционных органопластиков // Вопросы материаловедения. 2015. № 1 (81). С. 60–70.
17. Каблов Е.Н., Кулагина Г.С., Железина Г.Ф., Лонский С.Л., Куршев Е.В. Исследование микроструктуры однонаправленного органопластика на основе арамидных волокон Русар-НТ и эпоксидно-полисульфонового связующего // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 19–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-19-26.
18. Деев И.С., Кобец Л.П. Исследование микроструктуры и микрополей деформаций в полимерных композитах методом растровой электронной микроскопии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1999. Т. 65. № 4. С. 27–34.
19. Деев И.С., Каблов Е.Н., Кобец Л.П., Чурсова Л.В. Исследование методом сканирующей электронной микроскопии деформации микрофазовой структуры полимерных матриц при механическом нагружении // Труды ВИАМ. 2014. № 7. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.05.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-6-6.
20. Пахомов К.С., Антипов Ю.В., Чалых А.Е., Будылин Н.Ю., Стоянов О.В., Симонов-Емельянов И.Д. Энергетические параметры поверхности арамидных волокон // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. № 1. С. 100–103.
21. Чалых А.Е., Герасимов В.К., Бухтеев А.Е. и др. Совместимость и эволюция фазовой структуры смесей полисульфон–отверждающиеся эпоксидные олигомеры // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. 2003. Т. 45. № 7. С. 1148–1159.
22. Будылин Н.Ю., Шапагин А.В., Чалых А.Е. Сравнительные исследования взаимодиффузии и фазовых состояний в смесях эпоксидных олигомеров с полисульфонами и полиэфирсульфонами: сб. статей XIX Всерос. конф. «Структура и динамика молекулярных систем». М.: ИФХЭ РАН, 2012. Т. 2. С. 192–195.
23. Min H.S., Kim S.Ch. Fracture toughness of polysulfone/epoxysemi-IPN with morphology spectrum // Polymer Bulletin. 2003. Vol. 42. P. 221–227.
24. Woo E.M., Hseih H.K. Morphology development in epoxy/polymer systems: thermosetting epoxy micro particles with a thermoplastic shell // Polymer. 1998. Vol. 39. No. 1. P. 7–13.
25. Kim B.S., Chiba T., Inoue T. Phase separation and apparent phase dissolution during cure process of thermoset/thermoplastic blend // Polymer. 1995. Vol. 36. No. 1. P. 67–71.
26. Шапагин А.В. Структурообразование в системах эпоксидные олигомеры–термопласты: дис. ... канд. хим. наук. М., 2004. 163 с.

## References

1. *Aviation materials*: reference book in 13 vols. Ed. E.N. Kablov. 7th ed., add. and rev. Moscow: VIAM, 2015, vol. 7: Polymer composite materials, 209 p.
2. Zhang S., Zhao D. *Advances in materials science and engineering. Aerospace materials handbook*. CRC Press. Taylor & Francis Group, 2012, 781 p.
3. Singh A.K., Wanhill R.J.H., Prasad N.E. Lightweight ballistic armours for aero-vehicle protection. *Aerospace materials and material technologies*, 2017, vol. 2: Aerospace material technologies. pp. 541–567.
4. *Reference book on composite materials*. Ed. J. Lubin. Moscow: Mashinostroitel, 1988, book 1, 448 p.
5. Kablov E.N. Modern materials – the basis of innovative modernization of Russia. *Metally Evrazii*, 2012, no. 3, pp. 10–15.
6. Kablov E.N., Startsev V.O. Systematical analysis of the climatic influence on mechanical properties of the polymer composite materials based on domestic and foreign sources (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
7. Kablov E.N. The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period to 2030. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 7–17.
8. Kolobkov A.S. Polymer composite materials for various aircraft structures (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 6–7 (89), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 18, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44.
9. Mikhailin Yu.A. *Structural polymeric composite materials*. 2nd ed. St. Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2013, 822 p.
10. Zhelezina G.F., Gulyaev I.N., Soloveva N.A. Aramide organic plastics of new generation for aviation designs. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 368–378. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-368-378.
11. Roberts G.D., Revilock D.M., Binienda W.K. et al. Impact Testing and Analysis of Composites for Aircraft Engine Fan Cases. *Journal of Aerospace Engineering*, 2002, no. 15, pp. 104–110.
12. Zhelezina G.F., Solovieva N.A., Kulagina G.S., Shuldeshova P.M. Study of the possibility of increasing the impact resistance of thin-sheeted carbon fiber-reinforced plastics due to cladding with aramid organoplastics. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 18, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-35-42.
13. Laurens B.V. Development of a new hybrid material (ARALL) for aircraft structures. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1983, no. 22 (3), pp. 492–496.
14. Mukhametov R.R., Petrova A.P. *Thermosetting binders for polymeric composite materials*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: NRC "Kurchatov Institute" – VIAM, 2021, 528 p.
15. Petrova A.P., Mukhametov R.R., Shishimirov M.V., Pavlyuk B.Ph., Starostina I.V. Test methods and researches thermosetting binding for polymeric composite materials (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 12 (72), paper no. 07. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: May 11, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-62-70.
16. Zhelezina G.F., Voinov S.I., Chernykh T.E., Chernykh K.Yu. New aramid fibers Rusar-NT for reinforcing structural organoplastics. *Voprosy materialovedeniya*, 2015, no. 1 (81), pp. 60–70.
17. Kablov E.N., Kulagina G.S., Zhelezina G.F., Lonskii S.L., Kurshev E.V. Microstructure research of the unidirectional organoplastic based on Rusar-NT aramid fibers and epoxy-polysulfone binder. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 19–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-19-26.
18. Deev I.S., Kobets L.P. Study of the microstructure and microfields of deformations in polymer composites by scanning electron microscopy. *Zavodskaya laboratoriya. Material diagnostics*, 1999, vol. 65, no. 4, pp. 27–34.
19. Deev I.S., Kablov E.N., Kobets L.P., Chursova L.V. Research of the scanning electron microscopy method deformation of microphase structure of polymeric matrix at mechanical loading. *Trudy VIAM*, 2014, no. 7, paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 22, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-6-6.

20. Pakhomov K.S., Antipov Yu.V., Chalykh A.E., Budylin N.Yu., Stoyanov O.V., Simonov-Emelyanov I.D. Energy parameters of the surface of aramid fibers. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2016, vol. 19, no. 1, pp. 100–103.
21. Chalykh, A.E., Gerasimov, V.K., Bukhteev, A.E. et al. Compatibility and evolution of the phase structure of mixtures of polysulfone–curing epoxy oligomers, *Vysokomolekulyarnye soyedineniya*, Ser. A, 2003, vol. 45, no. 7, pp. 1148–1159.
22. Budylin N.Yu., Shapagin A.V., Chalykh A.E. Comparative studies of mutual diffusion and phase states in mixtures of epoxy oligomers with polysulfones and polyethersulfones. *Articles of XIX All-Rus. conf. "Structure and Dynamics of Molecular Systems"*. Moscow: IFCHE RAN, 2012, vol. 2, pp. 192–195.
23. Min H.S., Kim S.Ch. Fracture toughness of polysulfone/epoxysemi-IPN with morphology spectrum. *Polymer Bulletin*, 2003, vol. 42, pp. 221–227.
24. Woo E.M., Hseih H.K. Morphology development in epoxy/polymer systems: thermosetting epoxy micro particles with a thermoplastic shell. *Polymer*, 1998, vol. 39, no. 1, pp. 7–13.
25. Kim B.S., Chiba T., Inoue T. Phase separation and apparent phase dissolution during cure process of thermoset/thermoplastic blend. *Polymer*, 1995, vol. 36, no. 1, pp. 67–71.
26. Shapagin A.V. *Structure formation in systems epoxy oligomers–thermoplastics*: thesis, Cand. Sc. (Chem.). Moscow, 2004, 163 p.

#### Информация об авторах

**Кулагина Галина Серафимовна**, старший научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Железина Галина Федоровна**, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Шульдешова Полина Михайловна**, инженер-технолог 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Куршев Евгений Васильевич**, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

#### Information about the authors

**Galina S. Kulagina**, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Galina F. Zhelezina**, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Polina M. Shuldeshova**, First category engineer-technologist, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Evgeny V. Kurshev**, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 01.07.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 15.07.2022.  
The article was submitted 01.07.2022; approved and accepted for publication after reviewing 15.07.2022.