

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСПЛАВНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ СВЯЗУЮЩИХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРЕПРЕГОВ ОРГАНОПЛАСТИКОВ

© Г. Ф. Железина*, С. И. Войнов**, Г. С. Кулагина, Н. А. Соловьева

Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов
Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП ВИАМ),
105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17
E-mail: * jelezina@yandex.ru; ** voinovviam@mail.ru

Поступила в Редакцию 5 июля 2019 г.
После доработки 14 декабря 2019 г.
Принята к публикации 14 декабря 2019 г.

Показаны результаты исследования характеристик арамидных препрегов, полученных из расплавных связующих, и органопластиков на основе этих препрегов. Использование расплавных связующих взамен растворных обеспечивает экологическую безопасность производства арамидных препрегов, повышение стойкости органопластиков к воздействию влаги и другим факторам внешней среды, герметичность тонколистовых обшивок, а также возможность сочетания арамидных препрегов с современными препрегами углепластиков для создания гибридных конструкций.

Ключевые слова: арамидные волокна; органопластик; полимерные композиты; препрег; связующие
DOI: 10.31857/S004446182003010X

Эффективность применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) в авиационной технике обусловлена их высокими механическими и эксплуатационными характеристиками, низкой плотностью, отсутствием коррозионных поражений при эксплуатации. Возможность широкого варьирования свойств композитов за счет состава, схемы армирования и технологии позволяет создавать ПКМ под конкретные элементы конструкций, т. е. реализовать концепцию единства разработки материал–технология–конструкция [1–4].

В России накоплен большой опыт эксплуатации арамидных органопластиков в составе авиационных конструкций, который показывает, что эти материалы имеют высокую эксплуатационную надежность в различных климатических зонах. Однако в сравнении с композитами на основе стеклянных и углеродных волокон органопластики на основе арамидного воло-

на в большей степени сорбируют атмосферную влагу [5, 6]. И хотя по уровню сохранения конструктивных свойств при влагонасыщении органопластики не уступают угле- и стеклопластикам, повышенное водопоглощение традиционно считается основным недостатком этих материалов [7–10].

Один из путей повышения влагостойкости органопластиков — это использование в их производстве безрастворных связующих в сочетании с новыми более стойкими к поглощению влаги арамидными волокнами типа Русар НТ [11]. Необходимость применения безрастворных связующих обусловлена тем, что органопластики, которые изготавливаются по типовой растворной технологии, имеют склонность к повышенной пористости из-за невозможности полного удаления растворителя при формовании композита. Кроме того, использование безрастворных связующих при производстве препрегов необходимо

с позиции обеспечения экологической безопасности производства ПКМ [12, 13].

За рубежом для изготовления элементов авиационных конструкций (обшивки планера вертолетов, обшивки зализов и носков крыла самолетов и др.) фирмами DuPont и Teijin Aramid используется расплавный метод производства арамидных препрегов. Препреги изготавливают путем пропитки арамидной ткани безрастворными связующими, нагретыми выше температуры плавления [14, 15]. В России технологии изготовления препрегов из расплавов связующих разработаны только для стекло- и углепластиков [16]. Разработка подобных технологий для арамидных препрегов необходима, поскольку позволит повысить эксплуатационные характеристики деталей их органопластиков, повысить экологическую безопасность производства, изготавливать гибридные конструкции путем сочетания препрегов органопластиков с современными препрегами угле- и стеклопластиков [17].

Цель настоящей работы — исследование возможности использования расплавных полимерных связующих в сочетании с арамидными армирующими наполнителями, в том числе на основе арамидных волокон третьего поколения типа Русар НТ, для изготовления препрегов, предназначенных для производства изделий из органопластиков и гибридных конструкций.

Экспериментальная часть

Объектом исследования являлись арамидные препреги и органопластики на их основе. Для изготовления препрегов использовали полимерные связующие: эпоксидное связующее марки ВСЭ-1212, модифицированные полисульфоном эпоксидные связующие марок ВСК-14-3, ВК-36, ВСК-14-2МР, полициануратное связующее марки ВСТ-32, в качестве армирующего наполнителя использовали ткань техническую артикул 86-153-04Н из арамидных нитей Руслан и жгуты на основе арамидных волокон Русар НТ. Волокна Русар НТ — новая разработка российских ученых в области арамидных волокон третьего поколения [18]. Важным преимуществом этих волокон является повышенная стойкость к поглощению влаги по сравнению с арамидными волокнами первого и второго поколений (СВМ, Руслан, Армос) [19].

Препреги изготавливали на пропиточной установке Coatema фирмы Coatema Coating Machinery GmbH (Германия) путем пропитки армирующего наполнителя (арамидная ткань или арамидные жгуты) расплавом полимерного связующего. Формование

органопластиков проводили в автоклаве при повышенных температуре и давлении в соответствии с температурно-временными параметрами отверждения связующего.

Технологические характеристики препрегов органопластиков определяли в соответствии с ММ 1.2.038–2005 «Методика определения технологических свойств препрегов на основе арамидных тканей». Физические характеристики органопластиков определяли в соответствии с ММ 1.2.039–2005 «Методы оценки физических свойств органопластиков», температуру стеклования — в соответствии с ГОСТ Р 56753–2015 «Определение механических свойств при динамическом нагружении».

Определение механических характеристик органопластиков проводили в соответствии с ГОСТ 25.604–82 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на изгиб при нормальной, повышенной и пониженной температурах»; ГОСТ 25.601–80 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах»; ГОСТ 25.602–80 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температурах»; РД 50-675–88 «Методические указания. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Материалы композиционные. Методы испытаний на межслойный сдвиг»; ГОСТ 4647–15 «Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Шарпи».

Тепловлажностное старение органопластика исследовали в соответствии с ГОСТ 9.707–81 «Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы полимерные. Методы ускоренных испытаний на климатическое старение» при температуре 60°C и относительной влажности 85%. Испытания проводили в камере тепловлажностного старения Climats (Франция) с автоматическим поддержанием заданного режима испытаний; погрешность поддержания температуры составляла $\pm 2^\circ$, погрешность влажности $\pm 3\%$.

Климатическое старение органопластика проводили в камере тропического климата (в соответствии с СТП 1.595-20-100–2002 «Метод определения тропикостойкости материалов в лабораторных условиях»), позволяющей создать следующий циклический ре-

жим испытаний: 8 ч при температуре $50 \pm 5^\circ\text{C}$ и влажности 100%, затем 12 ч при температуре $20 \pm 5^\circ\text{C}$ и влажности 100%, затем 8 ч при температуре $20 \pm 5^\circ\text{C}$ и влажности 65%. Данный режим имитирует тепло-влажностные воздействия, характерные для тропического климата.

Влагостойкость и водостойкость образцов органопластика исследовали после выдержки в течение 90 сут при комнатной температуре и влажности 98% и при комнатной температуре в воде в соответствии с ГОСТ 4650–14 «Пластмассы. Методы определения водопоглощения».

Топливостойкость и маслостойкость образцов органопластика исследовали после выдержки в течение 30 сут при комнатной температуре в топливе ТС-1 и масле ИПМ-10 в соответствии с ГОСТ 12020–18 «Пластмассы. Методы определения стойкости к действию химических сред».

Воздухопроницаемость органопластиков определяли с помощью вакуумной камеры путем замера падения разрежения воздуха; расчет проводили по формуле $B = K(1 - P_{\text{ср}})$, где B — воздухопроницаемость ($\text{л} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$); K — коэффициент, учитывающий параметры прибора; $P_{\text{ср}}$ — среднее арифметическое значение давления по вакуумметру ($\text{кгс} \cdot \text{см}^{-2}$).

Обсуждение результатов

К арамидным препрегам, предназначенным для изготовления элементов авиационных конструкций, предъявляются требования к их физико-ме-

ханическим и технологическим характеристикам. Требования к технологическим характеристикам распространяются на массовое содержание связующего в препреге, поверхностную плотность и липкость препрега, возможность выкладки препрега по поверхности сложной кривизны (драпируемость), длительность хранения и т. д.

В табл. 1 в качестве примера приведены характеристики арамидных препрегов на основе типовых растворных эпоксидных связующих, которые были использованы для изготовления деталей серийных авиационных конструкций. Следует отметить, что арамидные препреги, используемые в авиационной промышленности для изготовления средненагруженных элементов конструкций, отличаются малой поверхностной плотностью ($160\text{--}195 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$), что необходимо для обеспечения заданной при конструировании деталей толщины монослоя органопластика ($0.11\text{--}0.12 \text{ мм}$). Для изготовления таких препрегов применяются тонкие ткани из арамидных нитей СВМ или Руслан линейной плотности 14.3 текс .

При переходе на расплавные связующие важно обеспечить в препреге такое же массовое содержание связующего, как в препрегах, полученных по растворной технологии. В количественном выражении массовое нанесение связующего на тонкие арамидные ткани СВМ арт. 56313, Руслан арт. 86-153-04Н должно составлять $70\text{--}130 \text{ г} \cdot \text{м}^{-2}$, при этом необходимо достигнуть равномерное распределение связующего в препреге. Сложность этой задачи обусловлена тем, что расплавные связующие

Таблица 1

Характеристики и область применения серийных арамидных препрегов* на основе растворных эпоксидных связующих

Показатель	Препрег 86-153-04Н/ЭДТ-69Н(М)	Препрег 56313/ЭДТ-69Н	Препрег 56313/УП-2227
Марка органопластика	Органит 12Т(М)-Рус	Органит 12Т	Органит 10Т
Поверхностная плотность препрега, $\text{г} \cdot \text{м}^{-2}$	170–180	160–195	160–195
Массовое содержание связующего, %	55 ± 3	50 ± 5	50 ± 5
Температура переработки, $^\circ\text{C}$	145	145	175
Срок хранения, мес, при температуре:			
не выше 25°C	3	3	3
не выше 6°C	6	6	6
Пример применения	Панели пола вертолета «Ансат»	Панели, обшивки фюзеляжа вертолета Ка-62	Зализ крыла, обшивки элеронов самолета Ту-204

* В обозначении препрега указан тип арамидного наполнителя и марка связующего.

Таблица 2
Характеристики препрегов на основе расплавных связующих

Показатель	Препрег 86-153-04Н/ВСК-14-3	Препрег 86-153-04Н/ВСЭ-1212	Препрег 86-153-04Н/ВСТ-32	Препрег Русар НТ(жгут)/ВСК-14-2-мР
Массовое содержание связующего, %	50 ± 5	50 ± 5	48 ± 3	36 ± 2
Поверхностная плотность наполнителя, г·м ⁻²	85 ± 4	85 ± 4	85 ± 4	200 ± 10
Поверхностная плотность препрега органопластика, г·м ⁻²	165 ± 15	165 ± 15	165 ± 20	333 ± 30
Температура переработки, °С	180	180	230	180
Срок хранения	3 мес при температуре не выше 25°С; 12 мес при температуре не выше 8°С	20 сут при температуре не выше 25°С; 12 мес при температуре не выше -18°С	20 сут при температуре не выше 25°С; 9 мес при температуре не выше -18°С	3 мес при температуре не выше 25°С; 12 мес при температуре не выше 8°С
Липкость	Присутствует	Присутствует	Присутствует	Присутствует
Толщина монослоя в органопластике, мм	0.11 ± 0.01	0.11 ± 0.01	0.11 ± 0.01	0.22 ± 0.03
Температура стеклования полимерной матрицы, °С	195	170	240	130
Прочность органопластика при изгибе, МПа	490	520	—	800

марок ВСК-14-3, ВК-36, ВСК-14-2мР имеют повышенную технологическую вязкость по сравнению с типовыми растворными связующими, так как являются многокомпонентными полимерными системами и содержат в своем составе высокомолекулярный модификатор (полисульфон).

Для достижения требуемого массового содержания и равномерности нанесения расплавного связующего на арамидный наполнитель были оптимизированы параметры технологического процесса на установке Coatema (температура разогрева связующего, размер технологических зазоров между валами ламинаторов и каландров, скорость движения армирующего наполнителя по пропиточному тракту и др.).

Сравнение данных, представленных в табл. 1 и 2, показывает, что характеристики поверхностной плотности и массового содержания связующего препрегов, изготовленных по расплавной и растворной технологиям, имеют близкие значения. Препреги на

основе расплавных препрегов на основе связующих ВСЭ-1212, ВСК-14-3, ВСТ-32, ВСК-14-2мР обладают хорошей липкостью и жизнеспособностью.

Основным технологическим преимуществом арамидных препрегов, изготовленных по расплавной технологии, является экологическая безопасность производственного процесса пропитки армирующего наполнителя из-за отсутствия растворителя. Замена растворных связующих расплавными для повышения экологической безопасности является мировой тенденцией производства препрегов. Технология производства препрегов органопластика на установке Coatema соответствует мировому уровню, эти препреги не уступают лучшим зарубежным аналогам (E-761/285 Kevlar фирмы Park Electrochemical Corp., Kevlar Prepreg HPP фирмы DuPont, HexWeb HRH-49 фирмы Hexcel).

Разработка технологии получения арамидных препрегов по расплавной технологии позволяет решить

Таблица 3
Воздухопроницаемость органопластиков на основе различных препрегов

Препрег	Толщина, мм	Длительность испытания, ч	Воздухопроницаемость, л·ч ⁻¹ ·м ⁻²
56313/УП-2227	0.45	120	130
56313/ЭДТ-69Н	0.48	240	145
86-153-04Н/ ЭДТ-69Н(М)	0.48	240	145
86-153-04Н/ВК-36	0.44	360	0
86-153-04Н/ ВСК-14-3	0.44	360	0

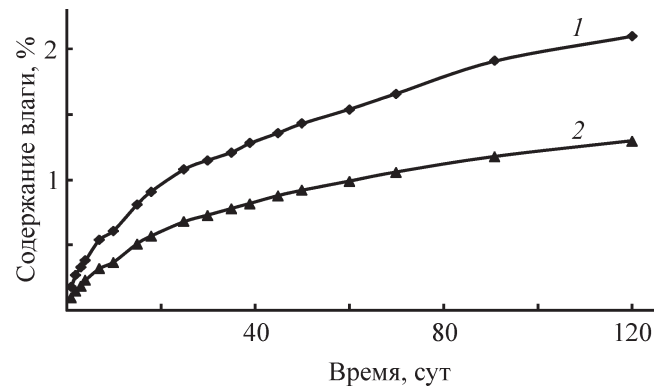
ряд задач по совершенствованию ПКМ авиационного назначения:

— обеспечить воздухопроницаемость тонколистовых (0.48 мм) органопластиков, предназначенных для обшивок трехслойных сотовых панелей;

— повысить стойкость органопластиков к поглощению влаги и воздействию факторов внешней среды;

— изготавливать гибридные конструкции путем сочетания арамидных препрегов с препрегами углеродными и стеклопластиков за единый технологический цикл.

Известно, что воздухопроницаемость (герметичность) является одним из основных требований, предъявляемых к тонколистовым обшивкам вертолетов Ка-50, Ка-62, Ми-28Н. При отсутствии герметичности возможно накопление воды в трехслойных сотовых панелях, их весовой дисбаланс и другие отрицательные последствия [20, 21]. Проведенные исследования (табл. 3) показали, что органопластики толщиной 0.44 мм, изготовленные из препрегов на ос-



Влагопоглощение органопластиков из препрегов, изготовленных на основе расплавного связующего ВСК-14-3 и ткани из нитей Руслан (1) и Русар НТ (2).

нове расплавных связующих ВК-36 и ВСК-14-3, непроницаемы для воздуха. Герметичность достигнута благодаря снижению пористости полимерной матрицы из-за отсутствия растворителей при изготовлении

Таблица 4

Результаты испытаний органопластиков из препрегов 86-153-04Н/ВСК-14-3 и 86-153-04Н/ВК-36 после экспозиций в различных условиях и агрессивных жидкостях

Условия и время экспозиции	Прочность при изгибе, МПа, органопластика на основе препрега	
	86-153-04Н/ВСК-14-3	86-153-04Н/ВК-36
Исходное состояние	460–550	470–510
Камера тепловлажностного старения при температуре 60°C и относительной влажности 85%, 90 сут	480–520	480–520
Камера тропического климата, 90 сут	490–520	480–510
Влага при температуре 20°C и относительной влажности 98%, 90 сут	490–500	—
Вода при температуре 20°C, 90 сут	480–500	—
Климатическая зона, умеренная с промышленной атмосферой (г. Москва), 1 год	480–520	—
Топливо ТС-1 при температуре 20°C, 30 сут	480–500	500–510
Масло ИПМ-10 при температуре 20°C, 30 сут	480–520	480–510

Таблица 5

Физико-механические характеристики органопластиков на основе расплавных связующих

Показатель	Равнопрочный органопластик	Однонаправленный органопластик
Прочность при растяжении, МПа	850	1970
Модуль упругости при растяжении, ГПа	34	105
Коэффициент Пуассона	0.12	—
Прочность при сжатии, МПа	220	—
Прочность при межслоевом сдвиге, МПа	45	—
Прочность при изгибе, МПа	490	800
Модуль упругости при изгибе, ГПа	22	23
Ударная вязкость, кДж·м ⁻²	260	—
Плотность, кг·м ⁻³	1355–1360	1370–1380

препрегов, а также наличие высокомолекулярного компонента — полисульфона в ее составе.

Применение расплавных связующих, позволяющих повысить монолитность и снизить пористость ПКМ, способствует повышению стойкости органопластика к поглощению влаги тепловлажностным воздействиям. Влагопоглощение органопластика из арамидного препрега на основе ткани Руслан и связующего ВСК-14-3 не превышает 2.1% после выдержки 120 сут. Еще большая устойчивость к поглощению влаги имеет органопластик, армированный тканью из арамидных волокон третьего поколения Русар НТ — не более 1.3% после выдержки 120 сут (см. рисунок).

Снижение прочности при изгибе органопластиков не наблюдается (табл. 4) после натурной экспозиции 1 год в умеренной климатической зоне с промышленной атмосферой (г. Москва), после выдержки в камерах тепловлажностного старения и тропического климата 90 сут, после воздействия влаги и воды 90 сут, после выдержки в технических жидкостях 30 сут.

Равнопрочный органопластик изготовлен из препрега на основе ткани арт. 86-153-04Н и расплавного связующего ВСК-14-3, а однонаправленный органопластик — из препрега на основе жгутов Русар НТ и связующего ВСК-14-2-МР, их характеристики представлены в табл. 5.

Стоит отметить высокую удельную ударную вязкость у органопластиков (у равнопрочного органопластика 260 кДж·м⁻²). Для сравнения: у углепластика на основе препрега из равнопрочной углеродной ткани удельная ударная вязкость составляет 80 кДж·м⁻², а у однонаправленного — 120 кДж·м⁻². В связи с этим органопластик целесообразно использовать для защиты

деталей из углепластика от ударов, эрозии, механических повреждений. Например, лямбдаобразное пылезащитное устройство перспективного вертолетного двигателя выполнено из углепластика с поверхностными слоями органопластика с целью обеспечения стойкости конструкции к воздействию эрозионного потока пыли и песка. Такое сочетание углепластика с органопластиком позволило решить проблему сохранения работоспособности пылезащитного устройства в условиях повышенной запыленности с максимальной функциональной и весовой эффективностью.

Выводы

Органопластики, изготовленные из арамидных препрегов на основе расплавных связующих и серийных арамидных тканей из нитей Руслан, отличаются повышенной герметичностью, стойкостью к поглощению влаги и воздействию тепловлажностных условий. Дальнейшее увеличение стойкости органопластиков к поглощению влаги достигается при использовании препрегов на основе расплавных связующих в сочетании с армирующими наполнителями на основе арамидных волокон третьего поколения Русар НТ.

Органопластики на основе препрегов из арамидных наполнителей и расплавных связующих имеют высокие механические характеристики, стойкость к ударным воздействиям. Сочетание арамидных препрегов с препрегами углепластиков на основе тех же расплавных связующих позволит решить проблему создания современных гибридных угле-органопластиковых конструкций, в которых органопластик будет обеспечивать снижение плотности, защиту от удара, эрозии, механических повреждений.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация об авторах

Железина Галина Федоровна, к.т.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8023-2060>

Войнов Сергей Игоревич, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7537-7206>

Кулагина Галина Серафимовна, к.х.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1633-8028>

Соловьева Наталия Александровна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0664-4224>

Список литературы

- [1] Каблов Е. Н. Современные материалы — основа инновационной модернизации России // *Металлы Евразии*. 2012. № 3. С. 10–15.
- [2] Каблов Е. Н. Материалы нового поколения — основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // *Интеллект и технологии*. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
- [3] Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиац. материалы и технологии*. 2015. № 1. С. 3–33. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33>
- [4] Каблов Е. Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // *Вестн. РАН*. 2012. Т. 82. № 6. С. 520–530.
- [5] Li C.-S., Zhan M.-S., Huag X.-C., Zhou H., Li Y. Hydrothermal aging mechanisms of aramid fibers via synchrotron small-angle X-ray scattering and dynamic thermal mechanical analysis // *J. Appl. Polym. Sci*. 2013. V. 128. N 2. P. 1291–1296.
- [6] Derombise G., Chailleux E., Forest B., Riou L., Lacotte N., Vouyouvitch Van Schoors L., Davies P. Long-term mechanical behavior of aramid fibers in seawater // *Polym. Eng. Sci*. 2011. V. 51. N 7. P. 1366–1375.
- [7] Железина Г. Ф., Гуляев И. Н., Соловьева Н. А. Арамидные органопластики нового поколения для авиационных конструкций // *Авиац. материалы и технологии*. 2017. № 5. С. 368–378. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-5-368-378>
- [8] Раскутин А. Е., Соколов И. И. Углепластики и стеклопластики нового поколения // *Тр. ВИАМ: Электрон. науч.-техн. журн*. 2013. № 4. С. 9.
- [9] Железина Г. Ф. Конструкционные и функциональные органопластики нового поколения // *Тр. ВИАМ: Электрон. науч.-техн. журн*. 2013. № 4. С. 6.
- [10] Авилова И. А., Бузник В. М., Волков В. И., Железина Г. Ф., Морозов Е. В., Раскутин А. Е., Фалалева О. В. Исследования взаимодействия воды с полимерными композиционными материалами методом ядерного магнитного резонанса // *Авиац. материалы и технологии*. 2014. № 51. С. 30–36.
- [11] Tikhonov I. V., Tokarev A. V., Shorin S. V., Shchettinin V. M., Chernykh T. E., Bova V. G. Russian aramid fibres: Past–present–future // *Fibre Chem*. 2013. N 5. P. 1–8.
- [12] Мухаметов Р. Р., Ахмадиева К. Р., Ким М. А., Бабин А. Н. Расплавные связующие для перспективных методов изготовления ПКМ нового поколения // *Авиац. материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 260–265.
- [13] Тимошков П. Н., Хрульков А. В. Современные технологии переработки полимерных композиционных материалов, получаемых методом пропитки расплавным связующим // *Тр. ВИАМ: Электрон. науч.-техн. журн*. 2014. № 8. Ст. 04. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2014-0-8-4-4>
- [14] Langston P. Design and use of KEVLAR in aircraft structures // *SAE Technical Paper 850893*. 1985. <https://doi.org/10.4271/850893>
- [15] Kalaiyarsan A., Ramesh P. Paramasivam study of advanced composite materials in aerospace application // *Int. J. Sci. Res. Mechan. Mater. Eng*. 2018. V. 2. N 1. P. 8–17.
- [16] Кулагина Г. С., Железина Г. Ф., Тихонов И. В., Дориомедов М. С. Арамидные органопластики, состояние и перспективы // *Материалы II Всерос. науч.-техн. конф. «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения»*. М.: ФГУП «ВИАМ», 2017. С. 79–91.
- [17] Железина Г. Ф., Соловьева Н. А., Макрушин К. В., Рысин Л. С. Полимерные композиционные материалы для изготовления пылезащитного устройства перспективного вертолетного двигателя // *Авиац. материалы и технологии*. 2018. № 1. С. 58–63. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2018-0-1-58-63>
- [18] Железина Г. Ф., Войнов С. И., Черных Т. Е., Черных К. Ю. Новые арамидные волокна Русар НТ для армирования конструкционных органопластиков // *Вопр. материаловедения*. 2015. № 1 (81). С. 60–72.
- [19] Железина Г. Ф., Тихонов И. В., Черных Т. Е., Бова В. Г., Войнов С. И. Арамидные волокна третьего поколения Русар НТ для армирования органоэпоксидных авиационного назначения // *Пласт. массы*. 2019. № 3–4. С. 43–46.
- [20] Шульдешова П. М., Железина Г. Ф. Влияние атмосферных условий и запыленности среды на свойства конструкционных органопластиков // *Авиац. материалы и технологии*. 2014. № 1. С. 64–68. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2014-0-1-64-68>
- [21] Zhelezina G. F., Shuldeshova P. M. Structural organoplastics based on film adhesive // *Polym. Sci. Ser. D*. 2014. N 7. P. 172–176.