

УДК 678.747.2

*Г.Ф. Железина¹, Н.А. Соловьева¹, Г.С. Кулагина¹, П.М. Шульдешова¹***ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ
СТОЙКОСТИ К УДАРУ ТОНКОЛИСТОВЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ
ЗА СЧЕТ ПЛАКИРОВАНИЯ АРАМИДНЫМ ОРГАНОПЛАСТИКОМ**

DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-35-42

Проведен анализ научно-технической литературы и показана эффективность применения органопластиков в авиационных конструкциях в качестве экранов и покрытий, обеспечивающих защиту деталей из углепластика от повреждений, вызванных ударными и эрозионными воздействиями. Исследованы механические свойства и характер разрушения при ударе образцов углепластика, плакированных арамидным органопластиком в сравнении с образцами углепластика без плакирующего слоя. Показана возможность повышения за счет плакирования углепластика удельной ударной вязкости при изгибе на 22 % и уменьшение на 30 % площади повреждений при ударе с кинетической энергией 30 Дж.

Ключевые слова: органопластик, углепластик, плакирование, ударные воздействия, эрозионные воздействия, удельная ударная вязкость, тонколистовые обшивки.

*G.F. Zhelezina¹, N.A. Solovieva¹, G.S. Kulagina¹, P.M. Shuldeshova¹***STUDY OF THE POSSIBILITY OF INCREASING
THE IMPACT RESISTANCE OF THIN-SHEETED
CARBON FIBER-REINFORCED PLASTICS DUE
TO CLADDING WITH ARAMID ORGANOPLASTICS**

The article provides the analysis of the scientific and technical literature and the effectiveness of the use of organoplastics in aircraft structures as screens and coatings that provide protection of carbon parts from damage caused by shock and erosion. The paper examined the mechanical properties and the nature of impact fracture of carbon fiber-reinforced plastics samples without a cladding layer. It is shown that it is possible to increase the specific impact strength in bending by 22 % due to cladding of CFRP, and to reduce the area of damage by 30 % upon impact with a kinetic energy of 30 J.

Keywords: organoplastic, carbon fiber-reinforced plastic (CFRP), cladding, shock effect, erosional effect, specific impact strength, thin-sheet sheathing.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute»]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Широкое применение полимерных композиционных материалов взамен металлических – мировая тенденция при создании современных конструкций различного назначения [1, 2]. В авиационной технике применение высокопрочных полимерных композитов позволяет решить главную техническую проблему – снизить вес летательных аппаратов, что обеспечивает повышение их технико-экономической эффективности при эксплуатации (увеличение грузоподъемности, дальности полета, снижение расхода топлива и т. д.) [3, 4].

Важной является также возможность существенного сокращения затрат на производство, ремонт и обслуживание изделий путем применения полимерных композитов и современных технологических процессов их изготовления [5, 6].

В ряду полимерных композитов особое место занимают углепластики – материалы, которые благодаря комплексу физико-механических характеристик позволяют обеспечить максимально высокие значения конструкционной прочности и жесткости изделий. В авиационной технике углепластики используются для широкого круга деталей: силовых ответственных конструкций (лонжероны, створки шасси, закрылки и носки крыла), средне- и слабонагруженных обшивок и т. д. Углепластики являются одним из основных классов полимерных композиционных материалов, применяемых в настоящее время при разработке новых изделий авиационной техники [7–9].

В соответствии с постоянно возрастающими требованиями к летательным аппаратам увеличиваются и требования к техническим характеристикам конструкционных материалов. Применительно к углепластикам основной задачей является повышение их стойкости к ударным воздействиям. Углепластики, в сравнении с полимерными композитами на основе арамидных и стеклянных волокон, обладают меньшей ударной вязкостью и более чувствительны к наличию механических повреждений, дефектов и других концентраторов напряжений [10–12].

Вероятность ударных и эрозионных воздействий твердыми частицами (пыль, песок, мелкие камни) на внешние поверхности летательных аппаратов возникает при их взлете и посадке [13]. Кроме того, в процессе эксплуатации и наземного обслуживания возможны повреждения элементов конструкций из-за случайных ударных воздействий (падения инструментов, используемых при проведении ремонтных работ, и др.). Такие удары могут приводить к хрупкому разрушению деталей из углепластика или к образованию в них трещин, которые представляют потенциальную опасность в совокупности с воздействием эксплуатационных нагрузок и атмосферно-климатических факторов [14].

Один из путей повышения ударной стойкости углепластиков – это включение в их состав слоев арамидного органопластика, т. е. создание гибридных конструкций. Известно, что высокая стойкость органопластиков к механическому удару, эрозии и баллистическому воздействию обусловлена особенностью разрушения арамидных волокон. Разрушение органопластиков в отличие от стекло- и углепластиков сопровождается множественным разрушением самих армирующих арамидных волокон с образованием обширной поверхности разрушения, что требует больших затрат энергии [15, 16]. Сочетание углепластика с органопластиком в составе гибридного углеорганопластика позволяет реализовать преимущества двух классов полимерных композиционных материалов и нивелировать недостатки, свойственные каждому композиту, – низкую прочность при сжатии органопластика и склонность к хрупкому разрушению углепластика.

Физико-механические характеристики гибридных углеорганопластиков зависят от количественного соотношения, порядка чередования, схемы армирования слоев углепластика и органопластика и могут варьироваться в широких пределах. Положительным фактором, обеспечивающим высокую работоспособность гибридного углеорганопластика при эксплуатации, является близость значений температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) слоев углепластика и органопластика. Это предотвращает появление в композите высоких остаточных термических напряжений после формирования и при перепадах эксплуатационных температур [17]. Накопленный к настоящему времени положительный опыт эксплуатации углеорганопластиков в составе авиационной техники свидетельствует о высокой эффективности этих материалов для повышения весовой эффективности авиационных конструкций. Далее приведены примеры применения гибридных конструкций из углеорганопластиков в авиационной технике:

- обшивки воздушного тормоза, элерона, закрылков и носков крыла самолета Ту-334;
- створки передней опоры шасси самолета Ту-204;
- панели фюзеляжа вертолета Ка-62.

Арамидные органопластики благодаря высокой стойкости к ударным воздействиям [18] нашли применение как самостоятельные материалы в качестве защитных экранов для предотвращения растрескивания и хрупкого осколочного разрушения элементов конструкций из углепластиков. Например, в работе [19] предлагается использовать защитный экран из органопластика для обеспечения целостности закрылка из углепластика при столкновении самолета с птицами при эксплуатации.

Интерес представляет также использование арамидного органопластика в качестве эрозионностойкого лакирующего слоя углепластиковых деталей, которые в процессе эксплуатации подвергаются эрозионному воздействию потока твердых частиц (пыль, песок, град, мелкие камни). К таким деталям относятся элементы пылезащитного устройства вертолетного двигателя, тонколистовые обшивки планера и лопастей вертолетов. На рис. 1 в качестве примера показан корпус пылезащитного устройства (ПЗУ) из углепластика, поверхность которого защищена арамидным органопластиком и системой лакокрасочного покрытия (ЛКП), обеспечивающих эрозионную защиту и работоспособность устройства в потоках пыли и песка.

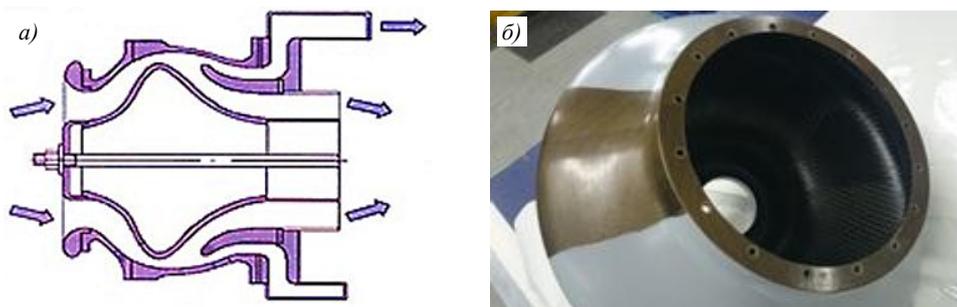


Рис. 1. Схема движения воздуха в пылезащитном устройстве (ПЗУ) λ -образного типа (а) и корпус ПЗУ из углепластика с лакирующим слоем органопластика (б)

Эрозионные и ударные воздействия представляют наибольшую опасность для тонкослойных обшивок из углепластика и деталей малой толщины. Использование элементов конструкций малой толщины наиболее характерно для современных беспилотных летательных аппаратов [20–22]. Ударные повреждения тонких обшивок могут привести к неконтролируемому росту трещины с последующим выходом из строя всего изделия. Принимая во внимание высокую ударную и эрозионную стойкость органопластиков, их способность тормозить развитие трещин [23], целесообразно рассмотреть возможность использования органопластиков в качестве внешнего лакирующего слоя тонколистовых обшивок и тонкостенных деталей из углепластиков.

Цель данной работы – исследование механических свойств и характера разрушения при ударе образцов углепластика, лакированных тонким слоем арамидного органопластика, с оценкой возможности использования лакировки органопластиком для повышения ударной стойкости тонколистовых обшивок из углепластика и тонкостенных элементов конструкций.

В статье приведены результаты механических испытаний, характеризующих стойкость к ударным воздействиям (ударная вязкость по Шарпи, удар падающим грузом, прочность при сжатии после удара) образцов углепластиков, лакированных и не-лакированных арамидным органопластиком.

Материалы и методы

Объектами исследования в работе являются углепластики, армированные равнопрочными углеродными тканями марки ВТКУ-2-200 (Россия) и артикула 4750 (фирма Porcher, Франция). Для изготовления углепластиков использовали связующие марок ВСК-14-2 (эпоксиполисульфоновое) и ВСТ-32 (полициануратное).

Исследуемые образцы углепластиков отличались наличием или отсутствием на поверхности лакирующего слоя из органопластика, армированного одним слоем арамидной ткани.

Исследовали образцы следующих составов:

- углепластик (ткань ВТКУ-2-200 + связующее ВСК-14-2) без лакирования органопластиком;
- углепластик (ткань ВТКУ-2-200 + связующее ВСК-14-2), лакированный органопластиком (ткань артикула 86-153-04Н + связующее ВСК-14-2);
- органопластик (ткань артикула 86-153-04Н + связующее ВСК-14-2);
- углепластик (ткань артикула 4750 + связующее ВСТ-32) без лакирования органопластиком;
- углепластик (ткань артикула 4750 + связующее ВСТ-32), лакированный органопластиком (ткань артикула 86-153-04Н + связующее ВСТ-32).

Образцы углепластиков с лакирующим и без лакирующего слоя изготавливали методом автоклавного формования с использованием препрегов, предварительно полученных на пропиточных установках. Лакирование органопластиком осуществляли путем совместного формования с углепластиком – за одну технологическую операцию.

Ударную вязкость при изгибе (по Шарпи) определяли на маятниковом копре Psd 50/15 по ГОСТ 4647–80, сжатие после удара – по ГОСТ 33495–2015. Стойкость к ударному воздействию образцов углепластиков с лакирующим и без лакирующего слоя оценивали также по характеру разрушения после удара (трещины, разломы, площадь повреждения). Нанесение механического удара на образцы углепластиков осуществляли свободно падающим грузом на вертикальном копре Ceast 9350 компании Instron (рис. 2).



Рис. 2. Вертикальный копер Ceast 9350 компании Instron

Для исследования характера разрушения при ударе тонколистового углепластика использовали плоские прямоугольные образцы размером 100×150 мм толщиной 0,6–0,7 мм. Исследуемый образец закрепляли в четырех точках в зажимном приспособлении в виде рамки с прямоугольным отверстием. Удар с кинетической энергией 30 Дж наносили бойком полусферической формы диаметром 16 мм.

Результаты и обсуждение

Механические свойства и ударная вязкость углепластика

Для анализа влияния лакирующего слоя на физико-механические свойства и ударную стойкость углепластиков проведены испытания образцов углепластика на основе углеродной ткани артикула 4750 и полициануратного связующего ВСТ-32. Испытаниям подвергали образцы углепластика с лакирующим слоем органопластика на основе ткани из арамидного волокна Руслан артикула 86-153-04Н и связующего ВСТ-32 и без лакировки.

В таблице приведены результаты испытаний образцов углепластика с лакирующим и без лакирующего слоя, а также представлены свойства органопластика. Из приведенных данных видно, что свойства при растяжении, сжатии и изгибе у образцов углепластика с лакирующим и без лакирующего слоя имеют близкие значения. Объемная доля лакирующего органопластика толщиной 0,12 мм в исследуемых образцах лакированного углепластика составляет небольшую величину: 4–5 %, поэтому наличие лакировки не приводит к заметному изменению упругопрочностных свойств лакированных образцов при статическом нагружении. Однако лакирующий слой оказывает большое влияние на величину удельной ударной вязкости образцов. Плакирование органопластиком толщиной 0,12 мм позволило увеличить удельную ударную вязкость образцов углепластика толщиной 4 мм на 22 %.

Физико-механические свойства образцов полимерных композиционных материалов

Свойства	Значения свойств для		
	органопластика	углепластика	углепластика, лакированного органопластиком
Плотность, кг/м ³	1350	1560	1560
Предел прочности при растяжении, МПа	750	895	890
Модуль упругости при растяжении, ГПа	36	65	64
Относительное удлинение, %	2,8	1,4	1,4
Предел прочности при изгибе, МПа	560	980	980
Модуль упругости при изгибе, ГПа	28	54	51
Предел прочности при сжатии, МПа	250	725	705
Удельная ударная вязкость при изгибе, кДж/м ²	205	118	144

Остаточная прочность при сжатии после удара

Для исследования остаточной прочности при сжатии после удара использовали образцы углепластика толщиной 5,6 мм со схемой армирования $[-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ]_{4s}$. Лакирующий слой органопластика, включающий один слой арамидной ткани, наносили с обеих сторон образца. В результате толщина образца увеличилась до 5,8 мм. Кинетическая энергия удара составляла 30 Дж.

Проведены исследования остаточной прочности при сжатии после удара образцов углепластика на основе углеродной ткани артикула 4750 и полициануратного связующего ВСТ-32, лакированных арамидным органопластиком.

Остаточная прочность при сжатии после удара образцов из углепластиков, МПа:

лакированного органопластиком	245;
без лакировки	260

Установлено, что остаточная прочность при сжатии исследованных образцов углепластика, плакированных органопластиком, составляет 245 МПа, что сопоставимо с остаточной прочностью при сжатии углепластика без плакирующего слоя.

Влияние плакировки на характер разрушения при ударе тонколистового углепластика

Ударному воздействию с кинетической энергией 30 Дж подвергали образцы углепластика толщиной 0,75 мм с плакирующим слоем органопластика. Толщина плакирующего слоя органопластика на образцах составляла 0,12 мм. Для сравнения аналогичным испытаниям подвергали неплакированные образцы углепластика толщиной 0,63 мм. В составе углепластика использовали углеродную ткань ВТКУ-2-200 и связующее ВСК-14-2, в составе органопластика – ткань артикула 86-153-04Н.

У всех образцов, подвергнутых удару, наблюдалось сквозное пробитие с образованием продольных и поперечных разломов. При испытании фиксировали размер образовавшихся трещин как с лицевой (со стороны удара), так и с оборотной стороны. На рис. 3 показан характер разрушения после удара свободным падающим грузом с энергией 30 Дж образцов из неплакированного углепластика.

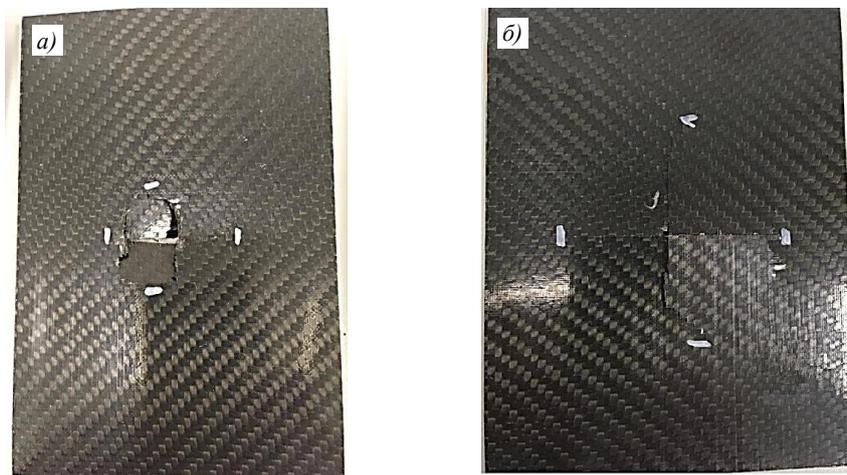


Рис. 3. Лицевая (а) и обратная (б) стороны образца углепластика после удара падающим грузом с энергией 30 Дж

Анализ характера разрушений показал, что размер поврежденной зоны углепластика с лицевой стороны составил 34×44 и 65×72 мм с оборотной стороны. Отмечено, что при возвратном движении бойка копра происходит «выворачивание» разрушенной части углепластика на лицевую сторону (рис.3, а), что при разрушении в полете может привести к дополнительному разрушению конструкции за счет воздействия воздушного потока.

На рис. 4 показан характер разрушения после удара свободным падающим грузом с энергией 30 Дж образцов углепластика с плакирующим слоем органопластика.

Образец углепластика с плакирующим слоем органопластика также имел сквозное пробитие при ударе падающим грузом с энергией 30 Дж. Однако размер и характер повреждений имеют отличия в сравнении с образцом без плакирующего слоя. Со стороны плакирующего слоя, по которой был нанесен удар (рис. 4, а), образовалось отверстие с ровными краями диаметром 16 мм (диаметр бойка). На оборотной стороне образца видны сквозные разломы углепластика (рис. 4, б), при этом зона повреждений составила 36×38 мм, что меньше, чем у образца углепластика, незащищенного плакирующим слоем.

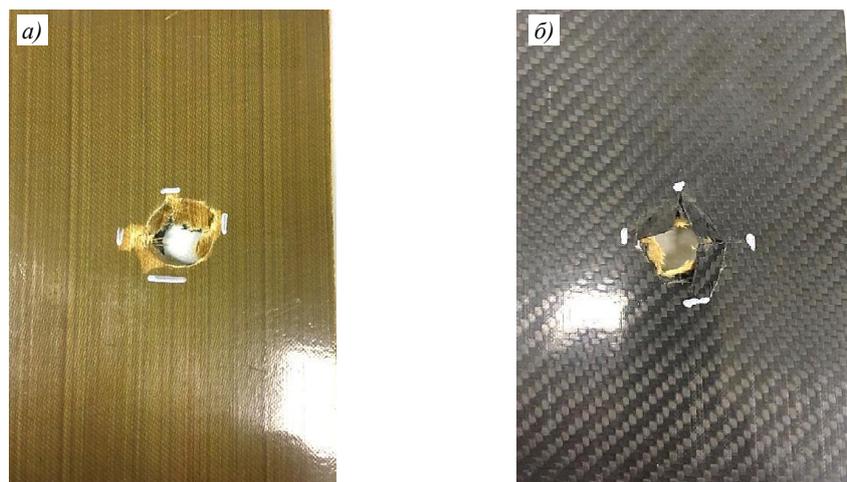


Рис. 4. Лицевая (а) и обратная (б) стороны образца углепластика с лакирующим слоем органопластика после удара падающим грузом с энергией 30 Дж

Таким образом, проведенные испытания показали, что наличие тонкого слоя органопластика (толщиной 0,12 мм) на поверхности углепластика толщиной 0,63 мм позволяет уменьшить растрескивание углепластика и сократить площадь повреждений приблизительно на 30 %.

Заключения

Исследованы механические свойства и характер разрушения при ударе образцов углепластика толщиной от 0,63 до 5 мм, лакированных тонким слоем (0,12 мм) арамидного органопластика. Проведенные исследования показали возможность повышения стойкости к удару тонколистовых углепластиков путем лакирования арамидным органопластиком, а именно:

- увеличение на 22 % удельной ударной вязкости при изгибе образцов углепластика на основе равнопрочной углеродной ткани и полициануратного связующего с лакирующим слоем арамидного органопластика толщиной 0,12 мм;

- уменьшение на 30 % площади повреждений при механическом ударе с кинетической энергией 30 Дж образцов углепластика толщиной 0,63 мм (на основе равнопрочной ткани и эпоксиполисульфонового связующего), лакированных арамидным органопластиком толщиной 0,12 мм.

Результаты исследования могут быть использованы для обеспечения эксплуатационной надежности при ударных и эрозионных воздействиях на тонколистовые обшивки и тонкостенные детали из углепластиков для перспективных вертолетов и беспилотных летательных аппаратов.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. материалов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
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. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
4. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. № 1. С. 36–39.
5. Каблов Е.Н., Подживотов Н.Ю., Луценко А.Н. О необходимости создания единого информационно-аналитического центра авиационных материалов РФ // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2019. № 3. С. 28–34.

6. 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: 24.05.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44.
7. Гуняева А.Г., Курносоев А.О., Гуляев И.Н. Высокотемпературные полимерные композиционные материалы, разработанные во ФГУП «ВИАМ», для авиационно-космической техники: прошлое, настоящее, будущее (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 1 (95). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.05.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53.
8. Сидорина А.И., Гуняева А.Г. Рынок углеродных волокон и композитов на их основе. Обзор // Химические волокна. 2016. № 4. С. 48–53.
9. Сидорина А.И. Механические свойства полимерных композиционных материалов на основе российских высокопрочных углеродных наполнителей и полимерных матриц нового поколения // Химические волокна. 2018. № 2. С. 16–19.
10. Кривонос В.В., Тарасов Ю.М. Инновационные композитные материалы и технологии в авиастроении // Композиты СНГ: Цифровизация и стоимостный анализ жизненного цикла изделий. М.: Ивент группа Musthavevents, 2018. С. 23–26.
11. 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: 21.05.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-6-6.
12. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Гриневиц Д.В., Шершак П.В. Обзор критериев прочности материалов // Труды ВИАМ. 2019. № 9 (81). Ст. 12 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.05.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-108-126.
13. Ерасов В.С., Котова Е.А. Эрозионная стойкость авиационных материалов к воздействию твердых (пылевых) частиц // Авиационные материалы и технологии. 2011. № 3 (20). С. 30–36.
14. Яковлев Н.О., Гуляев А.И., Лашов О.А. Трещиностойкость слоистых полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2016. № 4 (40). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.05.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-12-12.
15. Zhelezina G.F., Shuldeshova P.M. Structural organo plastics based on film adhesives // Polymer Science. Series D. 2014. Vol. 7. No. 3. P. 172–176.
16. Железина Г.Ф., Соловьева Н.А., Шульдешова П.М., Кан А.Ч. Влияние климатических факторов на свойства баллистически стойких органопластиков // Вопросы материаловедения. 2020. № 4 (104). С. 144–157.
17. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. М.: Научные основы и технологии, 2018. 822 с.
18. Валуева М.И. Современные материалы и технологии для получения бронезащитных изделий // Вопросы материаловедения. 2017. № 2 (90). С. 197–207.
19. Кан А.Ч., Железина Г.Ф., Соловьева Н.А. Арамидные органопластики для повышения птицестойкости элементов авиационных конструкций // Труды ВИАМ. 2021. № 1 (95). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.05.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-77-84.
20. Гайданский А.И., Тарасов Ю.М., Кривонос В.В., Бойцов Б.В. Комплекс исследований для обеспечения разработки и изготовления требуемого качества конструкции консоли крыла из композиционных материалов для перспективных гражданских самолетов // Научные труды Академии проблем качества. 2016. Спецвыпуск. С. 378–385.
21. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Причины зависимости механических характеристик трещиностойкости материала от размеров образца // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3 (52). С. 56–64. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-56-64.
22. Гуляев А.И., Яковлев Н.О., Орешко Е.И. Фрактографические признаки роста межслоевой трещины при нагружении углепластика по различным модам // Труды ВИАМ. 2019. № 12 (84). Ст. 11 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.05.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-99-108.
23. Bourke P. Ballistic impact on composite armor. Cranfield University, 2007. 290 p.