

УДК 678.83:620.165.79

П.М. Шульдешова¹, И.С. Деев¹, Г.Ф. Железина¹

ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ АРАМИДНЫХ ВОЛОКОН СВМ И КОНСТРУКЦИОННЫХ ОРГАНОПЛАСТИКОВ НА ИХ ОСНОВЕ

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-11-11

Исследован характер разрушения арамидного волокна СВМ и конструкционных органо-пластиков на его основе. Особенности разрушения волокна необходимо учитывать при разработке данного класса полимерных композиционных материалов. Рассмотрен характер разрушения волокон при растяжении и сжатии, а также поведение волокна СВМ при растяжении органопластика на его основе.

Ключевые слова: органопластик, арамидные волокна, расщепление волокон, фибриллы, микропластик, ударная стойкость.

Nature of destruction of SVM aramide fiber and structural organoplastics on its basis is researched. Features of destruction of fiber are to be considered when developing this class of polymercomposites. Nature of fibers destruction is considered at stretching and compression, as well as behavior of SVM fiber at stretching of the organoplastics on its basis.

Keywords: organoplastics, aramide fibers, splitting fibers, fibrils, microplastics, impact resistance.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

Конструкционные органопластики, армированные арамидными волокнами, – самые легкие полимерные композиционные материалы (ПКМ) авиационного назначения. В ВИАМ разработан широкий ассортимент конструкционных и функциональных органопластиков, для армирования которых использованы отечественные арамидные волокна СВМ и Русар [1–4].

Целесообразность применения органопластиков в авиационной технике обусловлена уникальным комплексом их свойств, сочетанием высокой прочности с высокой ударной вязкостью, стойкостью к различного рода повреждениям. Эти материалы способны сохранять высокий уровень прочности и ресурса после механического удара различных типов и степени интенсивности в виде града, песка, мелких камней, соударения с птицами и др. [5–8].

Из арамидных органопластиков изготавливают легкие обшивки планера вертолетов, обшивки хвостовых секций несущих винтов вертолетов, обшивки зализов и носков крыла самолетов и др. [9]. Благодаря высокой устойчивости к ударным воздействиям детали из органопластиков способны выполнять функции защитных экранов. Так, использование органопластика Органит БНТ в конструкции корпуса вентилятора газотурбинных авиационных двигателей позволяет удерживать разрушившиеся лопатки вентилятора при попадании в двигатель птиц или инородных тел и обеспечивать тем самым надежную защиту планера и систем жизнеобеспечения самолета. Баллистически стойкий органопластик ВКО-2ТБ, способный защитить от пуль легкого ручного оружия и осколков взрывных устройств, используется в конструкции перегородки кабины

экипажа самолета «Суперджет» для защиты экипажа самолета при возникновении нештатной ситуации [10–12].

Высокая стойкость органопластиков к разрушению при эрозионных воздействиях, ударных и баллистических нагрузках обусловлена особенностью разрушения армирующих арамидных волокон. Разрушение органопластиков в отличие от стекло- и углепластиков сопровождается множественным разрушением самих армирующих волокон с образованием обширной поверхности разрушения [13–16]. Такой механизм разрушения требует больших затрат энергии, что обуславливает высокую ударную и баллистическую стойкость органопластиков.

Среди всех органических волокон арамидные нити имеют наиболее высокие эксплуатационные характеристики. Они отличаются устойчивостью к воздействию пламени, высоких температур, органических растворителей, нефтепродуктов и т. д. По сравнению с углеродными и стеклянными волокнами, арамидные волокна менее хрупкие и пригодны для переработки на обычном оборудовании текстильных производств [17–19].

Целью данной работы является исследование характера разрушения арамидных волокон и влияние особенностей арамидных волокон на поведение органопластиков при нагружении.

Материалы и методы

Объекты исследования – арамидные волокна СВМ (диаметр 14 мкм, плотность 1480 кг/м³, предел прочности при растяжении 4,5 ГПа, модуль упругости 113 ГПа), нити СВМ линейной плотности 14,3 текс, модельные микропластики на основе нити СВМ и образцы однонаправленного органопластика на основе нити СВМ и эпоксидного связующего.

Прочность волокна СВМ при растяжении определяли по результатам испытаний микропластика. Микропластик изготавливали путем пропитки одиночной нити связующим ЭДТ-10 с последующим отверждением при повышенной температуре. Прочность волокна в микропластике рассчитывали по формуле:

$$\sigma = (\dot{P} \cdot \rho) / T,$$

где \dot{P} – разрывная нагрузка микропластика, Н; ρ – плотность волокна, кг/м³; T – линейная плотность нити, текс.

Модуль упругости волокна СВМ определяли по скорости распространения ультразвукового импульса в нити длиной 0,5 м. Для проведения испытаний применяли прибор ультразвукового типа ГСП УК-13. Модуль упругости рассчитывали по формуле:

$$E = 10^{-9} \cdot \rho \left(\frac{l}{t} \right)^2,$$

где l – база измерения, м; t – время прохождения ультразвуковых колебаний, с; ρ – плотность волокна, кг/м³.

Образцы однонаправленного органопластика изготавливали методом прямого прессования препрега, выложенного в специальную оснастку для индивидуальных образцов (рис. 1). Оснастку использовали с целью уменьшения вероятности искривления нитей при формовании и исключения повреждаемости их при механической обработке образцов органопластика.

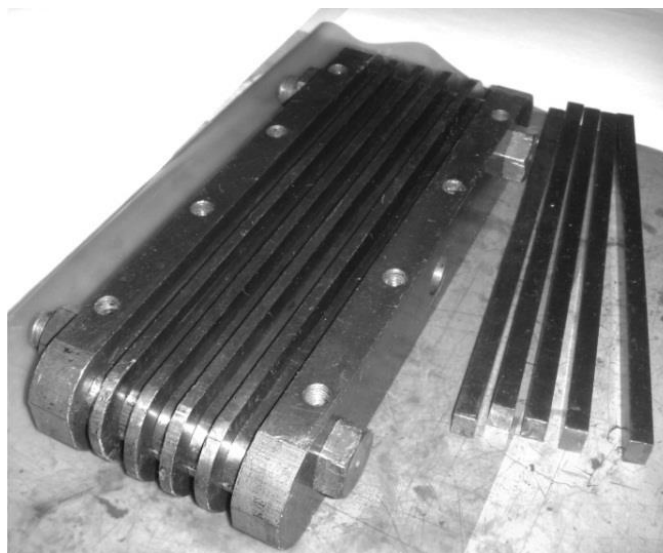


Рис. 1. Технологическая оснастка для формования однонаправленных образцов органопластика

Для исследования поверхностей разрушения, образовавшихся в процессе испытаний образцов нитей и органопластиков, применяли метод сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) [20–22].

Результаты

Волокнистые композиционные материалы характеризуются, с одной стороны, различным уровнем физико-механических свойств компонентов, а с другой – сложной пространственной структурой и расположением наполнителя. Все это приводит к анизотропии физико-механических свойств в объеме материала и сложнонапряженному состоянию арматуры даже при растяжении композита в продольном направлении.

На рис. 2–4 показан вид волокна СВМ в исходном состоянии и после действия растягивающих, сжимающих и изгибных нагрузок. Поверхность волокна до разрушения отличается однородностью строения и отсутствие видимых с помощью сканирующего электронного микроскопа микродефектов (рис. 2, а, б).

После испытаний на растяжение наблюдается растрескивание волокна в продольном направлении (рис. 2, в, г). Вдали от места разрыва обнаруживается большое число поврежденных волокон, при этом типичными видами разрушения являются изломы, сопровождающиеся расщеплением на отдельные фибриллы и сдвигом под углом 45 град по всему сечению волокна (рис. 3).

При поперечном сжатии и изгибе арамидное волокно деформируется и его первоначально круглое поперечное сечение превращается в прямоугольное (рис. 4).

Наблюдаемый характер разрушения арамидного волокна обусловлен особенностями его надмолекулярной структуры. Структурной единицей арамидных волокон являются жесткие макромолекулы или их агрегаты – фибриллы. Высокая прочность и жесткость таких волокон при растяжении обуславливаются высокой степенью ориентации макромолекул вдоль оси волокна и высокой энергией диссоциации химических связей в цепи исходного полимера. Характер разрушения предельно ориентированного волокна при одноосном растяжении обусловлен макронеоднородностью полимера, следствием чего является неодновременная работа отдельных структурных элементов волокна. Различие напряженного состояния соседних структурных элементов вызывает возникновение в граничной области напряжений сдвига, приводящих к макрофибрилизации и расщеплению волокна. В результате одноосное растяжение волокна

сопровождается ориентационным прорастанием межфбрилярных трещин вдоль направления действия растягивающего усилия. Однако расщепленное волокно до какого-то предела еще в состоянии воспринимать нагрузку. Расщепление волокон, очевидно, сопровождается одновременным обрывом отдельных наиболее напряженных фрагментов волокна, после чего нагрузка воспринимается следующим пучком фибрилл и т. д. вплоть до полного разрушения, сопровождающегося интенсивным расщеплением и распушиванием образца.

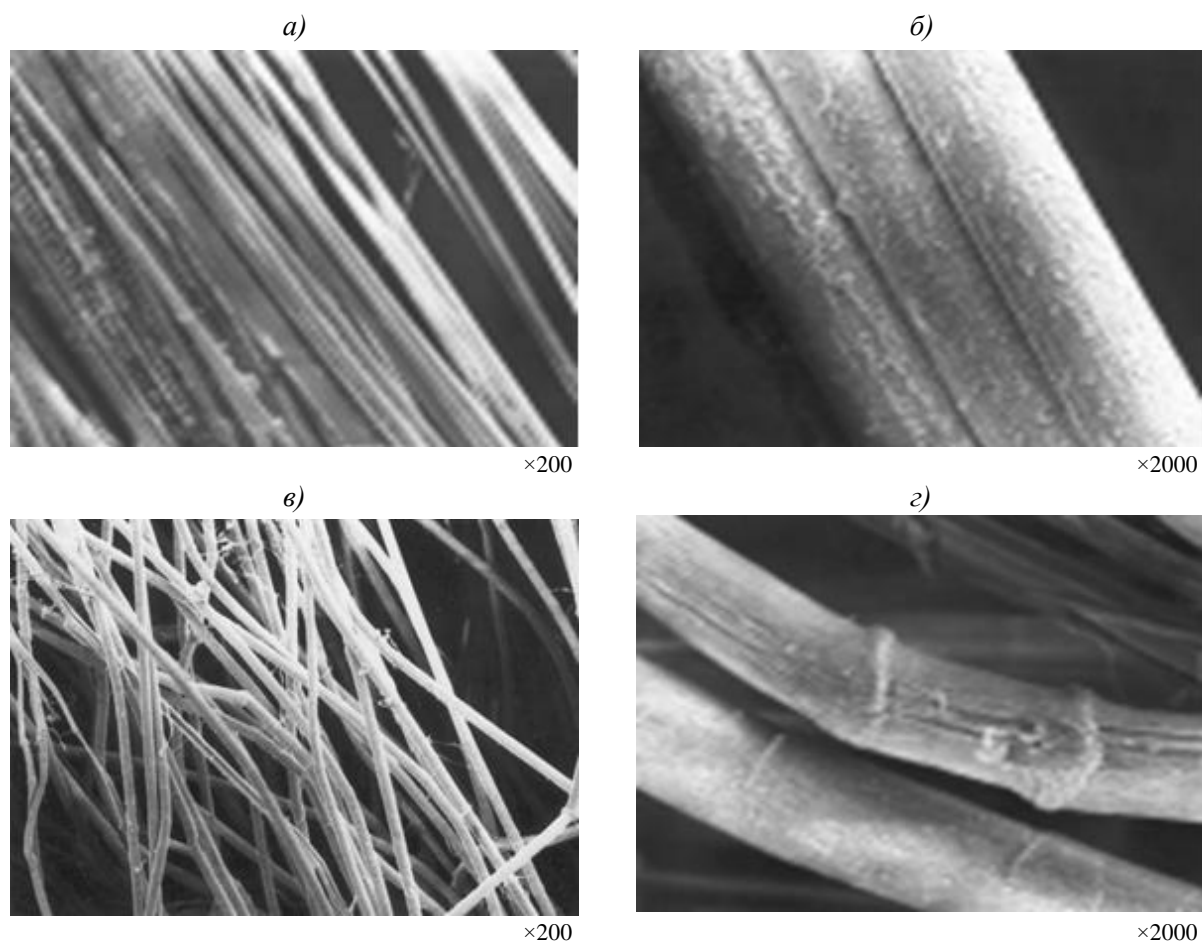


Рис. 2. Волокно СВМ до (а, б) и после (в, г) испытаний на растяжение

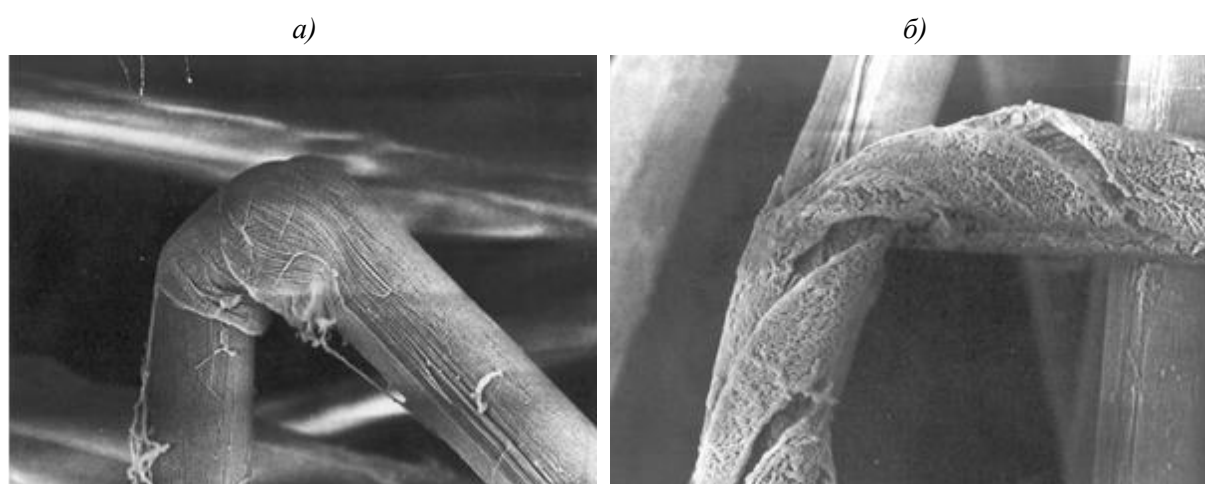


Рис. 3. Различные виды излома ($\times 2000$) волокна СВМ после испытаний на растяжение



Рис. 4. Вид (*a* – $\times 2000$; *б* – $\times 5000$) деформирования и разрушения волокна СВМ в петле (поперечное сечение)

Описанный выше характер разрушения арамидных волокон СВМ является следствием особенностей их надмолекулярной структуры, что в свою очередь обуславливает высокую степень анизотропии механических свойств волокон. Волокно СВМ имеет высокую прочность и жесткость при осевом растяжении и низкую жесткость в направлении, перпендикулярном оси волокна. При сжатии в поперечном направлении проявляется способность волокна к пластическому деформированию: волокно сохраняет монолитность, не разрушаясь, при больших деформациях.

На рис. 5 показан характер разрушения при растяжении однонаправленного органопластика на основе нити из волокна СВМ. В зоне разрыва можно видеть расщепление образца на отдельные продольные участки. В местах обрыва волокон наблюдается расщепление их на тонкие фибриллярные образования.

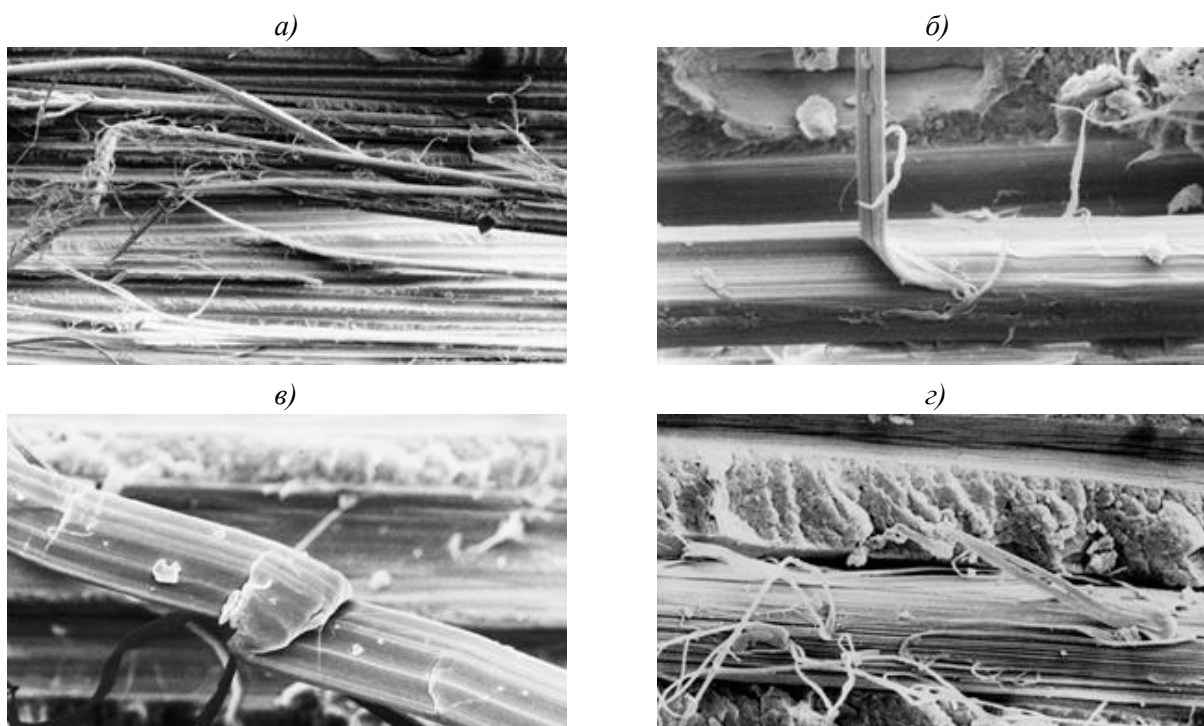


Рис. 5. Фрактография органопластика на основе волокна СВМ после разрушения (*a* – $\times 200$; *б*, *в*, *г* – $\times 2000$):

a – типовой характер разрушения волокон СВМ на границе с матрицей; *б* – микротрещины в матрице после отрыва волокон; *в*, *г* – отрыв ленточных фибриллярных образований от поверхности волокна

При растяжении однонаправленного органопластика разрушение идет не по границе раздела «волокно–полимерная матрица», а по самому волокну СВМ. Это свидетельствует о том, что трансверсальная прочность волокна меньше, чем когезионная прочность связующего и прочность сцепления волокна с полимерной матрицей. После испытаний на поверхностях разрушения пластика обнаруживается большое число поврежденных волокон СВМ. В этом случае наблюдается продольное расщепление поверхностного слоя волокон с отрывом отдельных фибриллярных образований и их агрегатов (см. рис. 1, а, б, з), образование в слое матрицы между волокнами небольших локальных микротрещин (рис. 1, з). Кроме того, в волокнах наблюдается образование полос сдвига под углом 45 град (рис. 1, в). Вследствие низкой прочности волокон на поперечное растяжение и продольный сдвиг в слоях органопластика практически не наблюдается адгезионного разрушения по границе «волокно–матрица». Описанный характер разрушения органопластика, очевидно, связан с тем, что перераспределение напряжений в образце происходит не только посредством полимерной матрицы от волокна к волокну, но также вследствие взаимодействия отдельных, в разной степени напряженных пучков фибрилл внутри одного макронеоднородного арамидного волокна [22].

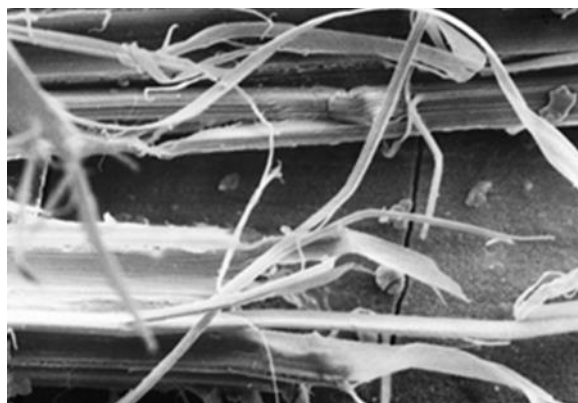


Рис. 6. Типовой характер разрушения органопластика на основе волокон СВМ ($\times 1000$)

В результате разрушение проходит по когезионному механизму преимущественно по поверхностному слою волокон СВМ с отщеплением от них фибриллярных образований и частично по слою матрицы, где образуются небольшие вырывы из локальных областей матрицы (рис. 6).

Обсуждение и заключения

Анализ характера разрушения арамидных волокон СВМ и органопластика на его основе показывает, что в органопластиках проявляются все особенности арамидных волокон, обусловленные их высокоориентированной фибриллярной надмолекулярной структурой. Энергоемкий процесс разрушения органопластиков, сопровождающийся образованием обширной поверхности разрушения вследствие множественного расщепления и фибриллизации волокон, обуславливает высокую устойчивость органопластиков к усталостным нагрузкам, ударным, баллистическим и эрозионным воздействиям.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // *Вестник Российской академии наук*. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
3. Железина Г.Ф. Конструкционные и функциональные органопластики нового поколения // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №4. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.09.2015).

4. Каблов Е.Н., Кириллов В.Н., Жирнов А.Д., Старцев О.В., Вапиров Ю.М. Центры для климатических испытаний авиационных ПКМ // *Авиационная промышленность*. 2009. №4. С. 36–46.
5. Железина Г.Ф., Шульдешова П.М. Конструкционные органопластики на основе пленочных клеев // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2014. №2. С. 9–14.
6. Нефедов Н.И., Кондрашов Э.К., Семенова Л.В., Лебедева Т.А. Эрозионностойкие покрытия для защиты изделий из полимерных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S3. С. 25–27.
7. Краев И.Д., Образцова Е.П., Юрков Г.Ю. Влияние морфологии магнитного наполнителя на радиопоглощающие характеристики композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S2. С. 10–14.
8. Сидоренко Ю.Н. Конструкционные и функциональные волокнистые композиционные материалы. Томск: ТГУ, 2006. 107 с.
9. Шульдешова П.М., Железина Г.Ф. Влияние атмосферных условий и запыленности среды на свойства конструкционных органопластиков // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №1. С. 64–68.
10. Шульдешова П.М., Железина Г.Ф. Арамидный слоисто-тканый материал для защиты от баллистических и ударных воздействий // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №9. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.09.2014). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-6-6.
11. Шульдешов Е.М., Лепешкин В.В., Романов А.М. Метод неразрушающего контроля комплексной диэлектрической проницаемости входных слабо наполненных слоев градиентных радиопоглощающих полимерных композиционных материалов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №10. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.09.2014). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-11-11.
12. Семенова Л.В., Новикова Т.А., Нефедов Н.И. Климатическая стойкость и старение лакокрасочного покрытия // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S3. С. 31–34.
13. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // *Редкие земли*. 2014. №3. С. 8–13.
14. Войнов С.И., Железина Г.Ф., Соловьева Н.А., Ямщикова Г.А., Тимошина Л.Н. Влияние внешней среды на свойства углепластика, полученного методом пропитки под давлением (RTM) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №2. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.09.2014). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-8-8.
15. Беляев А.А., Романов А.М., Широков В.В., Шульдешов Е.М. Измерение диэлектрической проницаемости стеклосотопласта в свободном пространстве // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №5. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.09.2014). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-5-6-6.
16. Шульдешов Е.М., Лепешкин В.В., Романов А.М. Метод неразрушающего контроля коэффициента отражения радиопоглощающих полимерных композиционных материалов // *Контроль. Диагностика*. 2015. №6. С. 44–48.
17. 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.
18. Донецкий К.И., Хрульков А.В. Принципы «зеленой химии» в перспективных технологиях изготовления изделий из ПКМ // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S2. С. 24–28.
19. Донецкий К.И., Хрульков А.В. Применение натуральных волокон при изготовлении полимерных композиционных материалов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №2. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.09.2014). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-10-10.
20. 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: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №7. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.09.2014). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-6-6.
21. 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.
22. Деев И.С., Кобец Л.П. Исследование микроструктуры и особенностей разрушения эпоксидных полимеров и композиционных материалов на их основе // *Материаловедение*. 2010. №5. С. 8–16 (начало). 2010. №6. С. 13–18.