

УДК 678.83

Г.С. Кулагина¹, Г.Ф. Железина¹, Н.М. Левакова²**АНТИФРИКЦИОННЫЕ ОРГАНОПЛАСТИКИ
ДЛЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-89-96

Представлены антифрикционные органопластики Оргалон АФ-1МР-260 и Оргалон АФ-1МР-500 на основе тканых армирующих наполнителей, содержащих в своем составе антифрикционные политетрафторэтиленовые волокна и силовые арамидные волокна. Материалы разработаны в целях снижения стоимости и повышения нагрузочной способности по сравнению с типовыми органопластками Оргалон АФ-1М-260 и Оргалон АФ-1М-500.

Получены данные о коэффициенте трения, нагрузочной способности органопластиков. Показано, что разработанные материалы являются высокоэффективными антифрикционными материалами для высоконагруженных самосмазывающихся узлов трения скольжения и могут применяться во многих областях техники – например, авиационная техника, железнодорожный транспорт, машиностроение, строительство, реконструкция мостов и т. д.

Ключевые слова: антифрикционный органопластик, высоконагруженный узел трения, самосмазывающийся материал, армирующий тканый наполнитель, политетрафторэтиленовое волокно, арамидное волокно, коэффициент трения, нагрузочная способность.

G.S. Kulagina¹, G.F. Zhelezina¹, N.M. Levakova²**ANTIFRICTION ORGANOPLASTICS
FOR HIGH-LOADED FRICTION KNOTS**

The work presents antifriction organoplastics Orgalon AF-1MR-260 and Orgalon AF-1MR-500 based on reinforcing fabric fillers containing antifriction polytetrafluoroethylene fibers and aramid power fibers. The materials are designed to reduce the cost and increase the load capacity compared to standard organoplastics Orgalon AF-1M-260 and Orgalon AF-1M-500.

The data on the friction coefficient, the load capacity of organoplastics were obtained. It is shown that the developed materials are highly effective antifriction materials for high-loaded self-lubricating friction knots and can be used in many areas of technics – for example, aircraft engineering, railway transport, mechanical engineering, building, re-construction of bridges and so on.

Keywords: antifriction organoplastic, high-loaded friction knot, self-lubricating material, reinforcing fabric filler, polytetrafluoroethylene fiber, aramid fiber, friction coefficient, load capacity.

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

²Общество с ограниченной ответственностью «Текс-Центр» [Limited Liability Company «Teks-Tsentr»]; e-mail: info@teks-centre.ru

Введение

Полимерные композиционные материалы на основе полимерной матрицы и наполнителя являются привлекательными для изготовления изделий антифрикционного назначения, работающих без смазки. Их особенностью является то, что наряду с антифрикционными свойствами они могут обладать высокими значениями удельной

прочности, долговечности, износостойкости, химической стойкости, маслостойкости и т. д. – их свойства можно варьировать в широком диапазоне в зависимости от состава, соотношения компонентов, введения функциональных добавок. В качестве полимерной матрицы используются различные классы термопластов (полиэтилен, полиамиды, фторопласты и др.) и реактопластов (эпоксидные, фенолформальдегидные, полиэфирные и др.). Дисперсной фазой могут служить наполнители различной природы (неорганические – углеродные, асбестовые, металлические; органические – природные и синтетические полимеры) и формы (порошки, волокна, текстиль) [1–3].

Антифрикционные свойства материала могут быть реализованы как за счет полимерной матрицы, так и за счет дисперсной фазы. Для повышения антифрикционных свойств композиционных материалов в полимерную матрицу включают модификаторы, такие как графит, дисульфид молибдена, политетрафторэтилен и т. п. [1, 3–5]. Эти функциональные добавки за счет пролонгированного высвобождения на поверхности трения способствуют снижению коэффициента трения.

Эффективными материалами для самосмазывающихся подшипников являются органопластики – композиционные материалы, изготовленные с применением полимерных волокон. В качестве органического наполнителя применяют хлопчатобумажные, арамидные, полиэфирные, арселоновые и другие волокна или ткани. Преимуществом этих наполнителей является сочетание армирующих (силовых) и антифрикционных свойств [3, 5, 6].

Серийные антифрикционные органопластики марок Оргалон АФ-1М-260 и Оргалон АФ-1М-500 разработаны во ФГУП «ВИАМ» и в настоящее время широко применяются для формирования поверхности самосмазывающихся узлов трения скольжения в авиационных конструкциях [7–15]. Например, они используются для изготовления шарниров системы управления, шарниров стоек шасси, роликов и шарниров предкрылка и закрылка самолета, подшипников опоры крыла, шарниров крепления демпфера лопастей самолетов и вертолетов и др. Многолетний опыт эксплуатации высоконагруженных агрегатов авиационных конструкций показал высокую эффективность применения органопластиков марки Оргалон АФ-1М. При изготовлении подшипников органопластики формируются из препрега на металлической несущей основе (нержавеющая сталь, конструкционная сталь, титановые сплавы) в виде покрытия в один слой. Формирование антифрикционного материала может быть осуществлено на поверхностях различной кривизны. На рисунке в качестве примера показан вид подшипника с антифрикционным покрытием – органопластиком Оргалон АФ-1М.



Подшипник с антифрикционным покрытием Оргалон АФ-1М

Эксплуатационные свойства органопластиков Оргалон АФ-1М определяются наличием в составе армирующего наполнителя политетрафторэтиленовых волокон, обладающих антифрикционными свойствами, и полиимидных волокон, обеспечивающих устойчивость органопластика под нагрузкой (ткани технические арт. 5392-81 и 5387/2-79). К недостаткам этих материалов можно отнести их высокую стоимость.

В связи с постоянным ростом требований к техническому уровню и конкурентоспособности современных технических устройств важной задачей является совершенствование эксплуатационных свойств антифрикционных органопластиков, повышение их нагрузочной способности, снижение стоимости, обеспеченность недефицитными исходными материалами и компонентами.

Целью данной работы является разработка и исследование свойств антифрикционных органопластиков для изготовления узлов трения, работающих без смазки при давлении до 250–300 МПа и имеющих более низкую стоимость по сравнению с типовыми органопластиковыми марки Оргалон АФ-1М.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [16, 17].

Материалы и методы

Объектами исследования являются антифрикционные органопластики марок Оргалон АФ-1МР-260 и Оргалон АФ-1МР-500 (ТУ1-595-11-1033–2008) – полимерные композиционные материалы, содержащие связующее АФК-101 (ТУ1-595-11-906–2006) и полимерную ткань из политетрафторэтиленовых и арамидных волокон – ткани арт. 5392-81Р (ТУ8278-161-35227510–2008) или арт. 5387/2-79Р (ТУ8278-162-35227510–2008). Связующее АФК-101, используемое в составе антифрикционных органопластиков, представляет собой раствор термореактивных фенолформальдегидных смол и нитрильного каучука в этилацетате и ацетоне. Связующее АФК-101 обеспечивает формирование полимерной матрицы, а также адгезионное соединение антифрикционного органопластика с металлической подложкой.

Изготовление органопластиков осуществляли в два этапа. На первой стадии осуществляли изготовление препрега органопластика; на второй – проводили формование органопластика из препрега. Препрег изготавливали методом пропитки из раствора связующего АФК-101 на установке типа УПСТ-1000М. Характеристики препрегов представлены в табл. 1. Содержание связующего в составе препрега марок Оргалон АФ-1МР-260 и Оргалон АФ-1МР-500 находится в диапазоне 15–20%, содержание летучих продуктов составляет 1,5–2,5%. Формование органопластика из препрега проводили при температуре отверждения связующего при 200°C аналогично технологическому процессу, представленному в работе [12].

Таблица 1

Свойства препрегов антифрикционных органопластиков

Свойства	Значения свойств для препрега	
	Оргалон АФ-1МР-260	Оргалон АФ-1МР-500
Массовая доля связующего, %	18–21	15–18
Массовая доля летучих продуктов, %	1,8–1,9	2,0–2,2
Массовая доля растворимых веществ связующего, %	99,5	99,8

Испытания органопластиков на трение и износ приводили на установке И-47 в режиме сухого трения при температуре 20±1°C. Схема сопряжения – торцевое трение

скольжения двух втулочных образцов, представляющих собой цилиндры. Первый вращающийся образец (контртело) изготовлен из стали 30ХГСА; второй неподвижный образец – с покрытием из органопластика. Скорость скольжения составляла 0,20 м/с, контактное давление 30 МПа.

На установке производили измерение силы трения (момента трения) при контакте пары трения – образцов антифрикционных органопластиков с металлическим контртелом. Коэффициент трения (f) антифрикционных органопластиков определяют из отношения силы трения между образцами к нормальной нагрузке при испытании согласно формуле

$$f = \frac{M_{\text{тр}}}{r \cdot P_{\text{ос}}},$$

где $M_{\text{тр}}$ – момент трения, Н·см; r – средний радиус образцов, см; $P_{\text{ос}}$ – осевая нагрузка на образцы, Н.

Прочность при отслаивании антифрикционного покрытия (органопластика) от конструкционной стали определяли в соответствии с ОСТ1 90315–88 на испытательной машине Zwick Z 005.

Образцы для испытаний на отслаивание представляют собой антифрикционное покрытие, нанесенное на металлическую подложку из конструкционной стали размером 100×25 мм и толщиной 2 мм. Изготовление образцов осуществляли следующим образом: на металлическую подложку, предварительно опескоструенную и обезжиренную, поочередно наносили 2–3 слоя связующего АФК-101, каждый слой сушили при комнатной температуре в течение 1 ч и затем в термощкафу при 80°С в течение 30 мин. На металлическую подложку укладывали преперг органопластика изнаночной стороной (стороной, обогащенной араמידными волокнами) по направлению утка тканого наполнителя. Образцы формовали в гидравлическом прессе в две стадии:

- при температуре 160°С и удельном давлении 0,10–0,15 МПа в течение 20 мин;
- при 200°С и удельном давлении ~2 МПа в течение 3 ч.

Тепловлажностное старение образцов, изготовленных для определения прочности при отслаивании, проводили при температуре 70°С и влажности 98% в течение 1 мес [18].

Для оценки нагрузочной способности антифрикционных органопластиков определяли их несущую способность. Образцы для испытаний представляют собой металлическую пластину с покрытием антифрикционного органопластика размером 20×20 мм. Способ изготовления образцов аналогичен способу, реализованному при изготовлении образцов для испытаний на отслаивание (см. ранее). Для определения несущей способности приготовленные образцы подвергали сжатию перпендикулярно плоскости листа. Подачу давления осуществляли с помощью гидравлического пресса при комнатной температуре в диапазоне от 20 до 300 МПа, длительность нагружения при каждом давлении составляла 30 мин. После выдержки под нагрузкой по изменению толщины антифрикционного покрытия определяли величину остаточной деформации органопластика. За величину несущей способности принимали значение удельного давления, при котором остаточная деформация составляет не более 0,02 мм.

Результаты и обсуждение

Анализ состояния исходного сырья для производства типовых антифрикционных органопластиков Оргалон АФ-1М-260 и Оргалон АФ-1М-500 показал, что полиимидные нити, используемые для формирования силового каркаса наполнителя,

являются наиболее дорогостоящим компонентом антифрикционного материала. Основные требования к волокнам для формирования силового каркаса антифрикционного материала – это высокие прочностные свойства и стойкость к высоким температурам. Полиимидное волокно, как известно, относится к термостойким – температура эксплуатации до 350°C. Относительная прочность при разрыве нити составляет 30–80 сН/текс.

Выбор силовых волокон взамен полиимидных для изготовления антифрикционных органопластиков проведен на основе анализа физико-механических характеристик современных отечественных технических волокон и их стоимости. В сравнении с полиимидными конкурентоспособными могут быть, например, арамидные волокна или стекловолно. Такие марки, как лавсан, капрон, полиакрилонитрил, имеют низкие значения механических характеристик и могут представлять интерес в качестве армирующего компонента антифрикционных материалов, работающих только при малых нагрузках с хорошим теплоотводом из зоны трения. Среди волокон, способных заменить полиимидные, наибольший интерес представляет арамидное волокно Русар (в настоящее время – торговая марка Руслан). Во-первых, это наиболее высокопрочное и высокомодульное отечественное волокно; во-вторых, арамидное волокно по сравнению со стеклянным не представляет потенциальной опасности в узле трения как абразивный материал. Поэтому для замены полиимидного волокна в составе тканевого наполнителя в данной работе использовали арамидное волокно Русар.

Хотя нити на основе арамидного волокна по сравнению с полиимидными нитями обладают более низкой теплостойкостью (температура эксплуатации – до 200°C), однако они имеют гораздо более высокие прочностные свойства – относительная прочность при разрыве нити 200–260 сН/текс. При этом стоимость арамидной нити в 2–3 раза ниже.

Ткани для антифрикционных органопластиков на основе арамидных волокон изготовлены двухуточным переплетением на базе неправильного четырехремизного атласа. Составы армирующих тканых наполнителей представлены в табл. 2 и 3. Нить основы состоит из политетрафторэтиленовых волокон, а нить утка – из политетрафторэтиленовых и арамидных волокон. Количество политетрафторэтиленовых нитей в ткани арт. 5392-81Р составляет не менее 200 г/м², в ткани арт. 5387/2-79Р – не менее 500 г/м². Ткань выполнена таким образом, чтобы на одной стороне преимущественно располагались нити из политетрафторэтиленовых волокон, а на другой – нити из арамидных волокон. Последние обеспечивают прочностные свойства материала и взаимодействие с полимерным связующим для адгезионного соединения с поверхностью металлической основы при формировании антифрикционного покрытия. Микроструктура ткани аналогична антифрикционной ткани из политетрафторэтиленовых и полиимидных нитей для изготовления серийных антифрикционных органопластиков Оргалон АФ-1М и описана в работе [5].

Таким образом, использование арамидных волокон в составе армирующих наполнителей взамен полиимидных волокон позволяет улучшить на 30–50% прочностные свойства наполнителей и на 40–50% снизить их стоимость.

Таблица 2

Состав ткани технической арт. 5387/2-79Р

Состав		Линейная плотность, текс	Количество сложений	Количество нитей на 1 см	Поверхностная плотность, г/м ²
Нить основы	Политетрафторэтиленовое волокно	44,0	2	45	399,6
Нить утка	Политетрафторэтиленовое волокно	44,0	2	15	140,2
	Арамидное волокно	29,4	2	15	90,6
Суммарное количество политетрафторэтиленовых волокон, г/м ²					541,6
Поверхностная плотность ткани, г/м ²					629,8

Таблица 3

Состав ткани технической арт. 5392-81Р

Состав		Линейная плотность, текс	Количество сложений	Количество нитей на 1 см	Поверхностная плотность, г/м ²
Нить основы	Политетрафторэтиленовое волокно	44,0	1	36	132,0
Нить утка	Политетрафторэтиленовое волокно	44,0	1	20	88,0
	Арамидное волокно	29,4	1	20	58,0
Суммарное количество политетрафторэтиленовых волокон, г/м ²					246,0
Поверхностная плотность ткани, г/м ²					304,0

В табл. 4 представлены свойства тканей арт. 5392-81Р и арт. 5387/2-79Р, имеющих в своем составе арамидные волокна. Показано, что их физико-механические свойства в 1,5–2,0 раза выше, чем у ткани, содержащей полиимидные волокна [11].

Таблица 4

Свойства технических тканей арт. 5392-81Р и арт. 5387/2-79Р

Свойства	Значения свойств для тканей	
	арт. 5392-81Р	арт. 5387/2-79Р
Поверхностная плотность, г/м ²	300–330	600–635
Разрывная нагрузка полоски ткани 50×200 мм, Н: по основе по утку	1100	2000
	3240	4670
	Толщина ткани, мкм	330

Для подтверждения эффективности применения армирующих наполнителей с арамидными волокнами (ткани арт. 5392-81Р и арт. 5387/2-79Р) исследованы свойства органопластиков на их основе – Оргалон АФ-1МР-260 и Оргалон АФ-1МР-500.

В табл. 5 представлены основные характеристики материалов Оргалон АФ-1МР-260 и Оргалон АФ-1МР-500 в сравнении с типовыми органопластиками Оргалон АФ-1М-260 и Оргалон АФ-1М-500.

Таблица 5

Сравнительные свойства антифрикционных органопластиков

Свойства	Значения свойств			
	для разработанного органопластика		для серийного органопластика	
	Оргалон АФ-1МР-260	Оргалон АФ-1МР-500	Оргалон АФ-1М-260	Оргалон АФ-1М-500
Толщина органопластика, мм	0,25–0,32	0,46–0,52	0,25–32,00	0,45–0,52
Коэффициент трения, отн. ед.	0,10	0,10	0,12	0,12
Прочность при отслаивании органопластика от конструкционной стали при 20°С, Н/м (среднее значение): в исходном состоянии после тепловлажностного старения	2250	2120	1640	1530
	2000	1900	–	–
Максимальная температура эксплуатации, °С	200	200	200	200

Видно, что для органопластиков Оргалон АФ-1МР-260 и Оргалон АФ-1МР-500 значения прочности при отслаивании от конструкционной стали находятся в диапазоне 2100–2300 Н/м. Это на 25–30% выше по сравнению со значениями для типовых органопластиков Оргалон АФ-1М-260 и Оргалон АФ-1М-500. Стабильность прочностных свойств адгезионного соединения в термовлажностных условиях для исследуемых

антифрикционных органопластиков подтверждена результатами испытаний после выдержки материалов в течение 1 мес при температуре 70°C и влажности 98% (табл. 5). Показано, что сохранение прочности при отслаивании от металлической подложки составило 88–90% от исходной величины.

Коэффициент трения f разработанных антифрикционных органопластиков Оргалон АФ-1М-260 и Оргалон АФ-1М-500, определенный при скорости скольжения 0,2 м/с и контактном давлении 30 МПа, составляет не более 0,10. Материалы обладают высокой устойчивостью к износу.

В табл. 6 представлены данные об остаточных деформациях органопластиков Оргалон АФ-1МР-260 и Оргалон АФ-1МР-500, полученных при различных давлениях. Видно, что антифрикционные покрытия способны выдерживать высокие нагрузки: несущая способность органопластиков составляет 250 МПа (Оргалон АФ-1МР-500) и 300 МПа (Оргалон АФ-1МР-260). Следует отметить, что покрытие Оргалон АФ-1МР-260 с меньшей толщиной обладает большей несущей способностью.

Таблица 6

**Несущая способность антифрикционных органопластиков
Оргалон АФ-1МР-500 и Оргалон АФ-1МР-260**

Органопластик	Удельное давление, МПа	Остаточная деформация, мм
Оргалон АФ-1МР-500	20	0
	50	0,007
	100	0,010
	150	0,010
	200	0,013
	250	0,020
	300	>0,020
Оргалон АФ-1МР-260	20	0
	50	0
	100	0
	150	0,007
	200	0,010
	250	0,010
	300	0,020

Заключения

В результате работы разработаны антифрикционные органопластики марки Оргалон АФ-1МР на основе тканых наполнителей, содержащие арамидные и политетрафторэтиленовые волокна. Арамидные волокна являются армирующим компонентом тканевого наполнителя, а политетрафторэтиленовые волокна придают материалу антифрикционные свойства. Органопластики Оргалон АФ-1МР разработаны по аналогии с типовыми материалами марки Оргалон АФ-1М, тканый наполнитель которых содержит в своем составе полиимидные и политетрафторэтиленовые волокна.

Показано, что замена полиимидных волокон на арамидные в составе ткани позволяет на 30–50% повысить прочностные свойства армирующих наполнителей и на 30–40% снизить их стоимость. Использование наполнителя на основе арамидных волокон также способствует улучшению адгезионного взаимодействия антифрикционного покрытия с металлической основой. Прочность при отслаивании от конструкционной стали органопластика Оргалон АФ-1МР на 25–30% выше по сравнению с аналогичной характеристикой для органопластика Оргалон АФ-1М.

Установлено, что разработанные антифрикционные органопластики обладают высокой несущей способностью и могут выдерживать давление до 250–300 МПа. Коэффициент трения антифрикционных материалов Оргалон АФ-1МР, определенный при контактном давлении 30 МПа и скорости скольжения 0,2 м/с в паре трения «органопластик–конструкционная сталь», составляет 0,10.

Таким образом, показано, что разработанные материалы относятся к высокоэффективным материалам, служащим для изготовления высоконагруженных самосмазывающихся узлов трения скольжения, и могут быть применены в таких областях, как железнодорожный транспорт, воздушный транспорт, машиностроение, строительство и реконструкция мостов и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Современные машиностроительные материалы. Неметаллические материалы: справочник / под общ. ред. И.В. Горынина, А.С. Орыщенко. СПб.: Профessional, 2012. 916 с.
2. Воронков Б.Д. Подшипники сухого трения. Л.: Машиностроение, 1979. 224 с.
3. Адаменко Н.А., Агафонова Г.В. Триботехнические полимерные материалы. Волгоград: ВолгГТУ, 2013. 107 с.
4. Реферативный бюллетень научно-технической и патентной информации по углеродным материалам: М.: НИИГрафит, 2017. №9. 46 с.
5. Юдин А.С. Разработка износостойких, антифрикционных органотекстолитов на основе полиоксадиазольных тканей и полимер-минеральных модификаторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ИНЭОС РАН, 2013. 20 с.
6. Анисимов А.В., Бахарева В.Е., Балышко И.В., Гинзбург Б.М. и др. Характеристики органо-пластиков на основе фенольной матрицы и оксоланового волокна // Вопросы материаловедения. 2006. №2. С. 113–118.
7. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. №5. С. 7–27.
8. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
9. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
10. Органопластики // Конструкционные композиционные материалы [Электронный ресурс]. URL: <https://www.viam.ru/organoplastics> (дата обращения: 20.12.2018).
11. 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: 17.12.2018).
12. Кулагина Г.С., Коробова А.В., Зуев С.В., Железина Г.Ф. Исследование трибологических свойств органопластиков на основе тканого армирующего наполнителя // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №11 (47). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.12.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-11-6-6.
13. Кулагина Г.С., Коробова А.В., Ильичев А.В., Железина Г.Ф. Физические и физико-механические свойства антифрикционного органопластика на основе комбинированного тканого наполнителя и эпоксидного связующего // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №10 (58). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.12.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-8-8.
14. Препрег антифрикционного органопластика и изделие, выполненное из него: пат. 2404202 Рос. Федерация. №2009111566/05; заявл. 31.03.09; опубл. 20.11.10, Бюл. №32.
15. Соломенцева А.В., Фадеева В.М., Железина Г.Ф. Антифрикционные органопластики для тяжело нагруженных узлов трения скольжения авиационных конструкций // Авиационные материалы и технологии. 2016. №2 (41). С. 30–34. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-30-34.
16. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
17. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
18. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Шведкова А.К., Николаев Е.В. Исследование влияния климатических факторов и механического нагружения на структуру и механические свойства ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 41–45.