



УДК 678.747.2:678.029.664

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-7-7

**ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ НА СВОЙСТВА
УГЛЕПЛАСТИКА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ
ПРОПИТКИ ПОД ДАВЛЕНИЕМ (RTM)**

С.И. Войнов

Г.Ф. Железина

кандидат технических наук

Н.А. Соловьева

Г.А. Ямщикова

Л.Н. Тимошина

Февраль 2015

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

С.И. Войнов¹, Г.Ф. Железина¹, Н.А. Соловьева¹,
Г.А. Ямщикова¹, Л.Н. Тимошина¹

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ НА СВОЙСТВА УГЛЕПЛАСТИКА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ПРОПИТКИ ПОД ДАВЛЕНИЕМ (RTM)

Исследовано влияние климатических факторов и эксплуатационных жидкостей на свойства углепластика ВКУ-35, изготовленного методом пропитки под давлением. Показано, что углепластик ВКУ-35 имеет высокий уровень сохранения свойств при воздействии факторов внешней среды (не менее 75% от исходного значения) и не уступает в этом отношении типовому конструкционному углепластику КМУ-11тр, изготовленному методом автоклавного формования.

Ключевые слова: углепластик, углеродные волокна, пропитка под давлением, полимерные композиты.

S.I. Voinov, G.F. Zhelezina, N.A. Solovjova,
G.A. Yamshchikova, L.N. Timoshina

Environmental effects on properties of CFRP manufactured by RTM method

An influence of climatic factors and working fluids on properties of CFRP VKU-35 manufactured by RTM technology was studied. It was shown that CFRP VKU-35 has a high stability of properties under an influence of environmental factors (at least 75% of the initial value) and in this respect is not worse than the typical structural CFRP KМУ-11tr manufactured by auto-clave molding.

Keywords: CFRP, carbon fiber, RTM, polymer composites.

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

Развитие авиационной техники невозможно без совершенствования и внедрения новых материалов и технологий их производства. Полимерные композиционные материалы (ПКМ) прочно завоевали место среди конструкционных материалов в авиационной промышленности [1]. Их применение взамен металлических сплавов обеспечивает снижение массы конструкций, повышение ресурса эксплуатации, снижение трудоемкости изготовления и материалоемкости. Снижение массы авиационных конструкций благодаря применению новых материалов дает возможность снизить потребление топлива, увеличить полезную нагрузку (количество пассажиров и полезного груза) [2–4].

Зарубежные фирмы, такие как Airbus и Boeing, проводят исследования с целью увеличения объема применения углепластиков до 60% массы конструкции летательных аппаратов. В настоящее время фирма Airbus является лидером по объему применения ПКМ. В конструкции самолета A350 они составляют 53% массы планера. Российские авиастроители также стремятся увеличить объемы применения углепластиков в элементах конструкции новых изделий: ОАО Компания «Сухой» – в SSJ NG и ОАО «Корпорация „Иркут”» – в MC-21. Решение этой задачи вполне реально с учетом высоких механических свойств углепластиков и современного уровня развития технологий [5].

В настоящее время в России и за рубежом проводятся исследования, направленные на разработку материалов и технологий, позволяющих снизить затраты при изготовлении изделий из ПКМ [6, 7]. Это связано с тем, что для изготовления высоконагруженных авиационных конструкций из ПКМ используют преимущественно метод автоклавного формования. Недостатком автоклавного метода формования изделий является необходимость предварительного изготовления препрегов, что требует дополнительных трудо- и энергозатрат и снижает экологическую безопасность производства. При автоклавном формовании также невозможно изготовить детали с высоким качеством внешней и внутренней поверхности.

За рубежом для изготовления ПКМ широко применяют технологию пропитки под давлением (RTM), которая позволяет изготавливать детали сложной формы за одну технологическую операцию без предварительного изготовления препрега. Детали, изготавливаемые методом RTM, имеют высокую точность по геометрии и толщине и хорошее качество поверхности как с внешней, так и с внутренней стороны. Использование метода пропитки под давлением позволяет автоматизировать производство, улучшить условия труда и повысить качество продукции [8–11].

При изготовлении деталей методом RTM полимерное связующее поступает под давлением в герметичную форму, в которой находится сухой пакет армирующего волокнистого наполнителя (рис. 1). Затем осуществляется отверждение связующего при повышенной температуре, после чего готовая деталь извлекается из формы. Связующие, которые используются для изготовления деталей методом пропитки под давлением, должны отвечать определенным требованиям по уровню вязкости ($\leq 0,5$ Па·с) и иметь необходимую для проведения технологического процесса жизнеспособность [12–14].

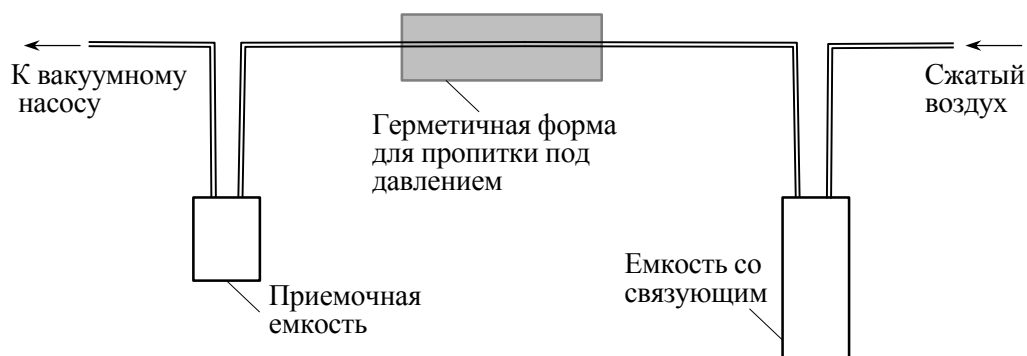


Рис. 1. Схема изготовления детали из ПКМ методом пропитки под давлением (RTM)

При выборе технологических параметров изготовления деталей методом RTM важно обеспечить равномерное распределение связующего в объеме армирующего наполнителя, исключить возможность образования пустот, пор и непропитанных участков, поскольку любое нарушение монолитности композиционного материала может привести к снижению его работоспособности в условиях воздействия факторов внешней среды в процессе хранения и эксплуатации.

Целью данной работы является исследование стабильности свойств углепластика, полученного методом пропитки под давлением, при воздействии факторов внешней среды (температуры и повышенной влажности) и эксплуатационных жидкостей (топливо, масло).

Материалы и методы

Объектом исследования является изготовленный методом RTM конструкционный углепластик ВКУ-35 на основе равнопрочной углеродной ткани российского про-

изводства с поверхностной плотностью 240 ± 40 г/м² и модифицированного эпоксидного связующего марки ВСЭ-17. Физико-механические характеристики углепластика ВКУ-35 представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Свойства конструкционного углепластика ВКУ-35,
изготовленного методом пропитки под давлением**

Характеристика	Направление приложения нагрузки	Значения свойств при температуре, °С	
		20	150
Предел прочности при растяжении, МПа	0	750	750
	90	680	700
Модуль упругости при растяжении, ГПа	0	71	–
	90	66	62
Коэффициент Пуассона	0	0,05	–
	90	0,04	–
	45	0,77	–
Предел прочности при сжатии, МПа	0	550	450
	90	470	400
Модуль упругости при сжатии, ГПа	0	62	–
	90	61	–
Предел прочности при межслоевом сдвиге, МПа	0	44	36
	90	40	35
Предел прочности при статическом изгибе, МПа	0	1000	890
	90	860	710
Модуль упругости при изгибе, ГПа	0	76	74
	90	75	73
Ударная вязкость, кДж/м ²	0	87	–
	90	79	–
Плотность, кг/м ³	–	1550–1580	–
Температура стеклования, °С	–	208	–
Категория горючести	–	Самозатухающий	–
Категория дымообразования	–	Сильнодымящий	–

Углепластик ВКУ-35 предназначен для эксплуатации при температуре от -60 до +150°С. Уровень сохранения свойств углепластика ВКУ-35 при максимальной рабочей температуре 150°С составляет: 100% – для предела прочности при растяжении, 81% – для предела прочности при сжатии, 89% – для предела прочности при изгибе.



Рис. 2. Внешний вид углепластика ВКУ-35

Равнопрочная углеродная ткань, использованная для армирования углепластика ВКУ-35 (рис. 2), наиболее пригодна для изготовления деталей методом RTM. При ее применении в качестве армирующего наполнителя значительно упрощается процесс сборки и пропитки пакетов для деталей сложной формы, чем при использовании однонаправленных углеродных армирующих наполнителей. Связующее ВСЭ-17, разработанное в ВИАМ применительно к технологии RTM, имеет необходимые технологические характеристики: вязкость связующего при нагреве до температуры переработки (95°C) составляет <0,5 Па·с (рис. 3, а) и жизнеспособность связующего при этой температуре составляет 135 мин (рис. 3, б), что достаточно для проведения процесса пропитки под давлением.

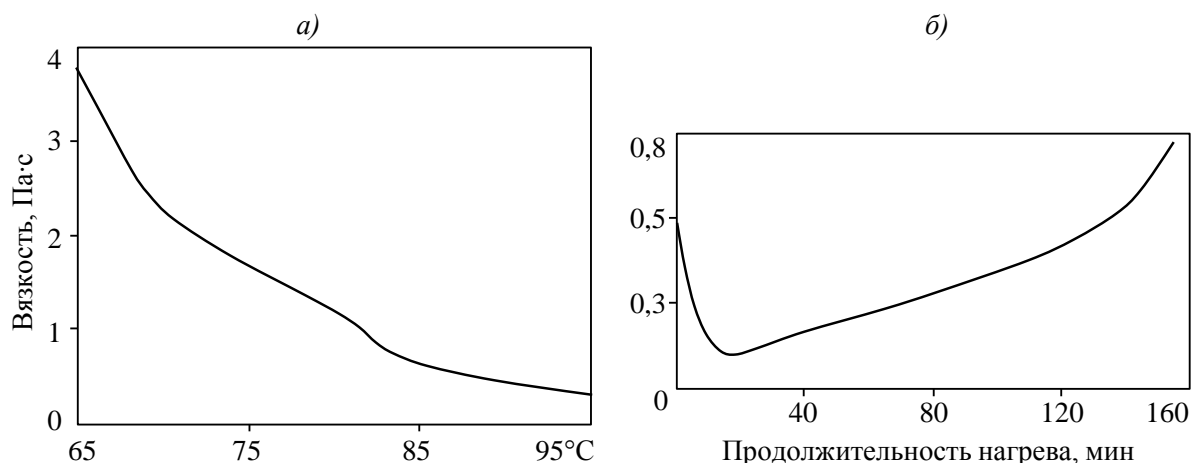


Рис. 3. Зависимость вязкости связующего ВСЭ-17 от температуры (а) и продолжительности нагрева при температуре 95°C (б)

Образцы углепластика ВКУ-35 для проведения исследований изготавливали на оборудовании фирмы Magnum Venus Plastech Ltd.

При эксплуатации и хранении изделия из ПКМ подвергаются воздействию температуры и влажности окружающего воздуха. В зависимости от конкретного применения изделия из ПКМ подвергаются либо длительному и непрерывному воздействию температуры и влажности окружающего воздуха, либо кратковременным воздействиям этих факторов. Значения температуры и влажности зависят от климатической зоны и ряда других факторов, непосредственно связанных с назначением изделия и, следовательно, с условиями эксплуатации. О стойкости ПКМ к совместному или последовательному воздействию температуры и влажности можно судить по изменению их эксплуатационных свойств. Испытания на стойкость полимерных материалов или изделий из них к воздействию температуры и влаги, которое может быть весьма разнообразным как по интенсивности, так и по продолжительности, проводятся в специальных автоматических тепловлажностных камерах [15–19].

Исследование влияния внешней среды (температуры, влажности) и эксплуатационных жидкостей на свойства углепластика ВКУ-35 проводили в указанных ниже условиях:

– *тепловое старение* – в воздушном термостате при температуре 150°C (максимальное отклонение температуры от заданного для термостата значения не превышало $\pm 0,5^\circ\text{C}$);

– *ускоренное тепловлажностное старение* – в соответствии с ГОСТ 9.707–81 при температуре 60°C и относительной влажности 85% в камере «Climats» (Франция) с автоматическим поддержанием заданного режима испытаний (погрешность поддержания

температуры составляла $\pm 2^{\circ}\text{C}$, погрешность влажности: $\pm 3\%$); после экспозиции в камере определяли прочность углепластика при сжатии;

– *климатическое старение* – в камере тропического климата по циклическому режиму испытаний: 8 ч (при $50\pm 5^{\circ}\text{C}$, $\varphi=100\%$)+12 ч (при $20\pm 5^{\circ}\text{C}$, $\varphi=100\%$)+8 ч (при $20\pm 5^{\circ}\text{C}$, $\varphi=65\%$), который имитирует тепловлажностное воздействие, характерное для тропического климата; после экспозиции в камере определяли прочность углепластика при сжатии;

– *влагостойкость* исследовали после выдержки в течение 90 сут при комнатной температуре и влажности 98%; затем определяли изменение предела прочности углепластика при сжатии и привес образца в результате поглощения влаги в соответствии с ГОСТ 4650–80;

– *водостойкость* исследовали после выдержки в течение 90 сут при комнатной температуре в воде; затем определяли изменение предела прочности углепластика при сжатии и привес образца в результате поглощения воды в соответствии с ГОСТ 4650–80;

– *топливостойкость* исследовали после выдержки в течение 30 сут при комнатной температуре в топливе ТС-1; затем определяли изменение предела прочности при сжатии и привес образца в результате сорбции топлива в соответствии с ГОСТ 12020–72;

– *маслостойкость* исследовали после выдержки в течение 30 сут при комнатной температуре в масле ИПМ-10; затем определяли изменение предела прочности при сжатии и привес образца в результате сорбции в соответствии с ГОСТ 12020–72.

Механические испытания углепластиков проводили на испытательных машинах Тиратест-2200 и РКМ-50 в соответствии с ГОСТ 25.602–80 (предел прочности при сжатии).

Результаты

В табл. 2 представлены результаты испытаний углепластика ВКУ-35 после экспозиции в камере тепловлажностного старения при температуре 60°C и относительной влажности 85%. Установлено, что после экспозиции в этих условиях в течение 90 сут уровень сохранения прочности углепластика ВКУ-35 при сжатии составляет 82 (при 20°C) и 69% (при испытании при рабочей температуре 150°C) по сравнению с исходными значениями при указанных температурах.

В табл. 3 представлены результаты испытаний углепластика ВКУ-35 после экспозиции в камере тропического климата. Установлено, что после экспозиции в этих условиях в течение 90 сут уровень сохранения прочности углепластика ВКУ-35 при сжатии составляет 88 (при 20°C) и 80% (при испытании при рабочей температуре 150°C) по сравнению с исходными значениями при указанных температурах.

Результаты испытаний углепластика ВКУ-35 после теплового старения при 150°C представлены в табл. 4. Установлено, что после теплового старения в течение 2000 ч уровень сохранения предела прочности при сжатии углепластика ВКУ-35 составляет 78 (при 20°C) и 79% (при 150°C) по сравнению с исходными значениями при этих температурах.

Таблица 2

Испытание углепластика ВКУ-35 после экспозиции в камере тепловлажностного старения при температуре 60°C и относительной влажности 85%

Продолжительность экспозиции, сут	Предел прочности при сжатии, МПа, при температуре, $^{\circ}\text{C}$	
	20	150
В исходном состоянии	600	480
30	590	380
60	540	320
90	490	330

Таблица 3

Испытание углепластика ВКУ-35 после экспозиции в камере тропического климата

Продолжительность экспозиции, сут	Предел прочности при сжатии, МПа, при температуре, °С	
	20	20
В исходном состоянии	600	480
30	530	420
60	520	370
90	530	380

Таблица 4

Тепловое старение углепластика ВКУ-35 при максимальной рабочей температуре 150°С

Продолжительность экспозиции, ч	Предел прочности при сжатии, МПа, при температуре, °С	
	20	20
В исходном состоянии	560	440
500	490	420
1000	450	400
2000	460	350

В табл. 5 представлены результаты исследования влаго- и водостойкости углепластика ВКУ-35. После выдержки образцов углепластика с незащищенными торцами в воде и в среде с повышенной влажностью ($\phi=98\%$) уровень сохранения прочности при сжатии составляет 100 (при 20°С) и 74% (при 150°С). Количество поглощенной углепластиком влаги не превышает 0,9% от исходной массы образца.

В табл. 6 представлены результаты исследования топливо- и маслостойкости углепластика ВКУ-35. После выдержки образцов углепластика с незащищенными торцами в топливе ТС-1 и масле ИПМ-10 уровень сохранения прочности при сжатии не меняется при 20°С. Выдержка образцов углепластика в масле ИПМ-10 не вызывает падения прочности при сжатии при рабочей температуре 150°С, а при выдержке в топливе ТС-1 прочность углепластика при сжатии при температуре 150°С снижается на 12% от уровня прочности углепластика при 150°С в исходном состоянии. Привес образцов углепластиков при выдержке их в эксплуатационных жидкостях не превышает 0,06% от исходной массы образцов.

Обобщенные результаты проведенных исследований по влиянию внешней среды и эксплуатационных жидкостей на свойства углепластика ВКУ-35, изготовленного методом пропитки под давлением, представлены в табл. 7 в сравнении со свойствами типового конструкционного углепластика КМУ-11тр, полученного по технологии автоклавного формования. Анализ полученных данных показывает, что углепластик ВКУ-35, изготовленный методом РТМ, не уступает углепластику КМУ-11тр по уровню сохранения свойств после воздействия факторов внешней среды. Это свидетельствует о том, что использование метода пропитки под давлением позволяет изготавливать ПКМ с монолитной структурой, в которой отсутствуют поры, внутренние локальные микропустоты и непропитанные участки. Углепластик ВКУ-35, изготовленный методом пропитки под давлением, не уступает по устойчивости к воздействию факторов внешней среды углепластикам, изготовленным типовыми методами формования.

Таблица 5

Влаго- и водостойкость образцов углепластика ВКУ-35

Условия экспозиции	Предел прочности при сжатии, МПа, при температуре, °С		Привес, %
	20	150	
В исходном состоянии	520	430	–
Влажность $\phi=98\%$ при 20°С в течение 90 сут	520	320	0,8
Вода при 20°С в течение 90 сут	500	320	0,9

Таблица 6

Топливо- и маслостойкость образцов углепластика ВКУ-35

Условия экспозиции	Предел прочности при сжатии, МПа, при температуре, °С		Привес, %
	20	150	
В исходном состоянии	520	430	–
Топливо ТС-1 при 20°С в течение 30 сут	510	380	0,03
Масло ИПМ-10 при 20°С в течение 30 сут	510	440	0,06

Таблица 7

Сравнение характеристик углепластика ВКУ-35, изготовленного методом РТМ, и углепластика КМУ-11тр, изготовленного методом автоклавного формования

Характеристика	Значения характеристики углепластика	
	ВКУ-35	КМУ-11тр
Предел прочности при растяжении, МПа	750	500
Модуль упругости при растяжении, ГПа	71	65
Предел прочности при сжатии, МПа	550	480
Модуль упругости при сжатии, ГПа	62	55
Предел прочности при статическом изгибе, МПа	1000	500
Модуль упругости при изгибе, ГПа	76	41
Ударная вязкость, кДж/м ²	87	70
Влагопоглощение при φ=98% в течение 90 сут, %	0,8	1,24
Сохранение прочности при сжатии после выдержки при φ=98% в течение 90 сут, %	100	90
Водопоглощение после выдержки в воде в течение 90 сут, %	0,9	1,28
Сохранение прочности при сжатии после выдержки в воде в течение 90 сут, %	96	85
Привес после выдержки в топливе в течение 30 сут, %	0,03	0,08
Сохранение прочности при сжатии после выдержки в топливе в течение 30 сут, %	98	100
Привес после выдержки в масле в течение 30 сут, %	0,06	0,11
Сохранение прочности при сжатии после выдержки в масле в течение 30 сут, %	98	100

Обсуждение и заключения

Проведены исследования по влиянию факторов внешней среды (температуры, влажности) и эксплуатационных жидкостей на стабильность свойств углепластика ВКУ-35, изготовленного методом пропитки под давлением. Установлено, что уровень сохранения свойств углепластика ВКУ-35 при тепловлажностном и ускоренном климатическом старении составляет не менее 74%, при воздействии эксплуатационных жидкостей – не менее 88% (при испытаниях при комнатной и максимальной рабочей температуре 150°С). По устойчивости к воздействию факторов внешней среды углепластик ВКУ-35, изготовленный методом пропитки под давлением, не уступает типовому конструкционному углепластику КМУ-11тр, изготовленному методом автоклавного формования.

Правильный выбор режимов изготовления при использовании метода пропитки под давлением позволяет получать ПКМ с монолитной структурой, в которой отсутствуют поры, внутренние, локальные микропустоты и непропитанные участки, и обеспечивает уровень свойств материалов не ниже, чем у ПКМ, полученных методом автоклавного формования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России //Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.

2. 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.
3. Гуняев Г.М., Кривонос В.В., Румянцев А.Ф., Железина Г.Ф. Полимерные композиционные материалы в конструкциях летательных аппаратов //Конверсия в машиностроении. 2004. №4(65). С. 65–69.
4. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники //Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
5. Гуляев И.Н., Зеленина И.В., Раскутин А.Е. Углепластики на основе углеродных тканей импортного производства и российских растворных связующих //Вопросы материаловедения. 2014. №1(77). С. 116–125.
6. Коган Д.И., Чурсова Л.В., Петрова А.П. Технология изготовления ПКМ способом пропитки пленочным связующим //Клеи. Герметики. Технологии. 2011. №6. С. 25–29.
7. Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р. Выбор технологических параметров автоклавного формования деталей из полимерных композиционных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2011. №3. С. 20–26.
8. Коган Д.И., Чурсова Л.В., Петрова А.П. Полимерные композиционные материалы, полученные путем пропитки пленочным связующим //Все материалы. Энциклопедический справочник. Композиционные материалы. 2011. №11. С. 2–6.
9. Чурсова Л.В., Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р. Особенности технологии изготовления деталей из композиционных материалов методом пропитки под давлением /В сб. тезисов докладов межотраслевой науч.-технич. конф. «Композиционные материалы в авиакосмическом материаловедении». М.: ВИАМ. 2009. С. 17.
10. Хрульков А.В., Душин М.И., Попов Ю.О., Коган Д.И. Исследования и разработка автоклавных и безавтоклавных технологий формования ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 292–301.
11. Тимошков П.Н., Коган Д.И. Современные технологии производства полимерных композиционных материалов нового поколения //Труды ВИАМ. 2013. №4 (viam-works.ru).
12. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Ким М.А., Бабин А.Н. Расплавные связующие для перспективных методов изготовления ПКМ нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 260–265.
13. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Чурсова Л.В., Коган Д.И. Новые полимерные связующие для перспективных методов изготовления конструкционных волокнистых ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 38–42.
14. Бабин А.Н. Связующие для полимерных композиционных материалов нового поколения //Труды ВИАМ. 2013. №4 (viam-works.ru).
15. Ефимов В.А., Шведкова А.К., Коренькова Т.Г., Кириллов В.Н. Исследование полимерных конструкционных материалов при воздействии климатических факторов и нагрузок в лабораторных и натуральных условиях //Авиационные материалы и технологии. 2013. №S2. С. 68–73.
16. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы старения //Деформация и разрушение материалов. 2011. №1. С. 34–40.
17. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения //Деформация и разрушение материалов. 2010. №11. С. 19–27.
18. Кириллов В.Н., Старцев О.В., Ефимов В.А. Климатическая стойкость и повреждаемость полимерных композиционных материалов, проблемы и пути решения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 412–423.
19. 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.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Sovremennye materialy – osnova innovacionnoj modernizacii Rossii [Modern materials – the basis of innovative modernization of Russia] //Metally Evrazii. 2012. №3. S. 10–15.
2. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
3. Gunjaev G.M., Krivonos V.V., Rumjancev A.F., Zhelezina G.F. Polimernye kompozicionnye materialy v konstrukcijah letatel'nyh apparatov [Polymer composite materials in aircraft structure] //Konversija v mashinostroenii. 2004. №4(65). S. 65–69.
4. Kablov E.N. Materialy i himicheskie tehnologii dlja aviacionnoj tehniki [Materials and chemical technologies, aircraft] //Vestnik Rossijskoj akademii nauk. 2012. T. 82. №6. S. 520–530.
5. Guljaev I.N., Zelenina I.V., Raskutin A.E. Ugleplastiki na osnove uglerodnyh tkanej importnogo proizvodstva i rossijskih rastvornyh svjazujushhij [Carbon composites based on carbon fabrics imported and Russian mortar binders] //Voprosy materialovedenija. 2014. №1(77). S. 116–125.
6. Kogan D.I., Chursova L.V., Petrova A.P. Tehnologija izgotovlenija PKM sposobom propitki plnochnym svjazujushhim [Manufacturing technology PKM impregnation method bonding film] //Klei. Germetiki. Tehnologii. 2011. №6. S. 25–29.
7. Dushin M.I., Hrul'kov A.V., Muhametov R.R. Vybor tehnologicheskijh parametrov avto-klavnogo formovanija detalej iz polimernyh kompozicionnyh materialov [The choice of process parameters autoclave molding parts from polymeric composite materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №3. S. 20–26.
8. Kogan D.I., Chursova L.V., Petrova A.P. Polimernye kompozicionnye materialy, polu-chennye putem propitki plnochnym svjazujushhim [Polymer composite materials obtained by impregnating the film binder] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocnik. Kompozicionnye materialy. 2011. №11. S. 2–6.
9. Chursova L.V., Dushin M.I., Hrul'kov A.V., Muhametov R.R. Osobennosti tehnologii izgotovlenija detalej iz kompozicionnyh materialov metodom propitki pod davleniem [Features of technology manufacturing parts made of composite materials by pressure impregnation] //V sb. tezisov dokladov mezhotraslevoj nauch.-tehnic. konf. «Kompozicionnye materialy v aviakosmicheskom materialovedenii». M.: VIAM. 2009. S. 17.
10. Hrul'kov A.V., Dushin M.I., Popov Ju.O., Kogan D.I. Issledovanija i razrabotka avto-klavnyh i bezavtoklavnyh tehnologij formovanija PKM [Research and development autoclave and non-autoclave molding technology PKM] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 292–301.
11. Timoshkov P.N., Kogan D.I. Sovremennye tehnologii proizvodstva polimernyh kompozicionnyh materialov novogo pokolenija [Modern production technology of polymer composite materials of new generation] //Trudy VIAM. 2013. №4 (viam-works.ru).
12. Muhametov R.R., Ahmadijeva K.R., Kim M.A., Babin A.N. Rasplavnye svjazujushhie dlja perspektivnyh metodov izgotovlenija PKM novogo pokolenija [Melt binders promising methods of manufacture of a new generation of PCM] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 260–265.
13. Muhametov R.R., Ahmadijeva K.R., Chursova L.V., Kogan D.I. Novye polimernye svjazujushhie dlja perspektivnyh metodov izgotovlenija konstrukcionnyh voloknistyh PKM [New polymeric binders for advanced manufacturing methods of structural fiber PKM] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №2. S. 38–42.
14. Babin A.N. Svjazujushhie dlja polimernyh kompozicionnyh materialov novogo pokolenija [Binders for polymeric composite materials of new generation] //Trudy VIAM. 2013. №4 (viam-works.ru).
15. Efimov V.A., Shvedkova A.K., Koren'kova T.G., Kirillov V.N. Issledovanie polimernyh konstrukcionnyh materialov pri vozdejstvii klimaticheskijh faktorov i nagruzok v laboratornyh i naturnyh uslovijah [The study of polymeric structural materials under the influence of climatic factors and stress in laboratory and field conditions] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №S2. S. 68–73.
16. Kablov E.N., Starcev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Klimaticheskoe starenie kompozicionnyh materialov aviacionnogo naznachenija. III. Znachimye faktory starenija [Climatic aging of composite materials aviation applications. III. Significant factors of aging] //Deformacija i razrushenie materialov. 2011. №1. S. 34–40.

17. Kablov E.N., Starcev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Klimaticeskoe starenie kompozicionnyh materialov aviacionnogo naznachenija. I. Mehanizmy starenija [Climatic aging of composite materials aviation applications. I. Mechanisms of aging] //Deformacija i razrushenie materialov. 2010. №11. S. 19–27.
18. Kirillov V.N., Starcev O.V., Efimov V.A. Klimaticeskaja stojkost' i povrezhdaemost' polimernyh kompozicionnyh materialov, problemy i puti reshenija [Weather resistance and defectiveness of polymer composite materials, problems and solutions] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 412–423.
19. Kirillov V.N., Efimov V.A., Shvedkova A.K., Nikolaev E.V. Issledovanie vlijanija klimaticeskikh faktorov i mehanicheskogo nagruzhenija na strukturu i mehanicheskie svojstva PKM [Investigation of the influence of climatic factors and mechanical loading on the structure and mechanical properties of the PKM] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №4. S. 41-45.