

УДК 678.747.2

А.Ф. Румянцев

**СОЗДАНИЕ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА СТВОРКИ ОТСЕКА ПОЛЕЗНОГО ГРУЗА
ДЛЯ БОЛЬШОГО ТРАНСПОРТНОГО САМОЛЕТА «БУРАН»**

В соответствии с ТЗ разработаны компоненты материала обшивки створки отсека полезного груза трехслойной конструкции на основе углеродной ленты Элур 0,08П и ткани из органических нитей СВМ. Проведенный комплекс исследований физико-механических характеристик материала комбинированной обшивки (КМУ-4э0,08+СВМ) и материала шпангоута (КМУ-4э0,08) в диапазоне температур $-130\div+160^{\circ}\text{C}$; оценка влияния влажности в сочетании с термоциклированием, имитирующим сезонный ($\pm 60^{\circ}$) и суточный ($\pm 30^{\circ}$) перепады температур; исследования несущей способности панелей при сжатии, изгибе, сдвиге и равномерном отрыве, а также выносливости панелей позволили подтвердить работоспособность углепластика КМУ-4э0,08 в качестве наружных слоев обшивки створки в сочетании со средним слоем органика на основе волокон СВМ (ткань артикул 5405/74) и углепластика КМУ-4э0,08 в качестве основного материала для шпангоутов, балок и накладок. Разработана технология подготовки поверхности обшивок толщиной 0,38 мм под склеивание с сотовым наполнителем ПСП-1 и плитками теплозащиты. Разработана технология и изготовлены четыре комплекта створок.

Применение углепластика позволило снизить массу конструкции створки отсека полезного груза на 640 кг по сравнению с металлическим аналогом.

Ключевые слова: углепластик, органик, тиснение поверхности, несущая способность панелей, шпангоуты, балки, створка.

Components of a skin material for the three-layer shutter of the effective load compartment were developed according to the requirements of the technical assignment. The skin is based on Elur 0,08P carbon tape and a fabric made from SVM organic threads. Complex researches of physical and mechanical properties of the combined skin (KMU-4e0,08+SVM) and frame (KMU-4e0,08) within the temperature range from -130 up to $+160^{\circ}\text{C}$, assessment of an influence of humidity in combination with temperature cycling simulating the seasonal ($\pm 60^{\circ}$) and diurnal ($\pm 30^{\circ}$) variations in temperature, researches of bearing capacity of panels at compression, bending, shift and uniform tearing, and also studies of service life of the panel allowed one to confirm operability of KMU-4e0,08 carbon plastic as an external layer of the shutter skin in combination with «Organit» organic plastic based on SVM fibers (fabric of 5405/74 mark) as an intermediate layer and KMU-4e0,08 carbon plastic as the base material of frames, beams and splice plates. A technology for surface preparation of 0,38 mm thick skin prior to adhesion with PSP-1 honeycomb filler and heat-shielding tiles is developed. The production technology was developed and four sets of shutters were manufactured.

Application of CFRP shutter allowed one to reduce weight by 640 kg as compared with an analogues metal construction.

Keywords: CFRP, «Organit» organic plastic, surface stamping, bearing capacity of panels, frames, beams, shutter.

Одним из основных назначений корабля «Буран» была доставка на орбиту тяжелых крупногабаритных грузов. Для этого в фюзеляже аппарата предусмотрен вместительный грузовой отсек – отсек полезного груза (ОПГ). Одной из задач, которые решались в ВИАМ при создании этой многогоразовой космической системы, была разработка легкого, прочного и технологичного материала для створок ОПГ. Такой материал был разработан.

Створка отсека полезного груза представляет собой крупногабаритный агрегат С-образной формы, включающий 8 панелей трехслойной конструкции с силовым набором. Габариты створки: $18\times 5,5$ м. Каждая панель состоит из внутренней и наружной обшивок, между которыми клеевой пленкой ВК-36 вклеен сотопластовый наполнитель ПСП-1 на основе полимерной бумаги. На наружные поверхности обшивок клеим Эласто-

сил 137-175М приклеивается специальное плиточное теплозащитное покрытие. Основной силовой набор составляют шпангоуты П-образного сечения, балки, диафрагмы, накладки.

Работа по созданию створки отсека полезного груза из углепластика проводилась в период 1977–1988 гг. Необходимо было решить множество задач, одна из которых заключалась в разработке углепластика, удовлетворяющего 125.

Основные требования ТЗ на материал створки предъявлялись к уровню свойств разрабатываемого углепластика: прочности при растяжении и сжатии должны быть выше 1260 и 1000 МПа соответственно, при модуле упругости при растяжении 140 ГПа и толщине монослоя $\leq 0,1$ мм. Больше всего этим требованиям соответствовал углепластик на основе углеродных нитей УКН-300 с уровнем свойств: $\sigma_{\text{в}}=1500$ МПа, $\sigma_{\text{в,сж}}=900$ МПа и $E=140$ ГПа.

Но так как нити выпускались только с 5000 филаментов, то толщина монослоя углепластика была в 2 раза больше требуемой. Здесь в один «узел» были завязаны: исходное сырье и технология получения полимерных волокон, очень сложная многостадийная технология переработки ПАН-волокна в углеродные волокна. В результате выставленные ВИАМ Минхимпрому требования по организации производства нитей УКН-300 с 1000 и 3000 филаментов и разработке равнопрочной ткани на их основе не были выполнены [1].

Варианты по использованию импортных углеродных нитей в 1000 филаментов не были приняты НПО «Молния» по принципиальным соображениям. В результате было принято решение использовать в конструкции деталей створки ОПГ на первом изделии отечественные материалы, выпуск которых освоен промышленностью [2].

Согласно характеристикам, заложенным в чертеж на створку ОПГ, материал обшивки должен удовлетворять следующим требованиям:

- прочность при растяжении ≥ 370 МПа;
- прочность при сжатии ≥ 370 МПа;
- прочность при сдвиге в плоскости листа ≥ 140 МПа;
- плотность материала 1400 кг/м³;
- толщина обшивки 0,38 мм.

Для выполнения этих требований был принят вариант обшивки из двух основных несущих слоев (верхний и нижний), определяющих прочность при растяжении и сжатии, и среднего слоя, ориентированного под углом 45 град к направлению армирования основных несущих слоев. В качестве основных несущих слоев обшивки на первом этапе был выбран углепластик КМУ-4э на основе углеродной ленты Элур-0,1П. В качестве наполнителя для среднего слоя были опробованы следующие материалы:

- углеродная лента Элур-0,1П;
- борные волокна;
- стеклоткань Т-10-80;
- стеклоткань Э-0,1;
- ткань из органических волокон СВМ;
- бумага из нитевидных кристаллов SiC;
- рогожка из плетеных углеродных лент и лент из ткани СВМ шириной (5, 10 и 20 мм).

В результате испытания по комплексу физико-механических показателей были выбраны варианты обшивок, содержащие в качестве среднего слоя ткань СВМ и плетеные рогожки из углеродной ленты [3, 4]. Однако в этом варианте обшивка не удовлетворяла требованиям ТЗ по толщине монослоя. Поэтому было решено изменить текстуру углеродной ленты – добиться ее утонения с целью получения на ее основе монослоя углепластика толщиной 0,08 мм. На основе углеродной ленты Элур-0,08 была создана конструкция обшивки с двумя слоями углепластика с прочностью при растяжении и сжатии 1000 МПа и слоя органо-пластика на основе волокон СВМ между ними.

Насколько это было верным решением проблемы – в отсутствие производства высокопрочной нити в 1000 филаментов – стало ясно намного позже, когда створка при статических испытаниях выдержала 100% расчетной нагрузки.

Окончательный выбор оптимального варианта материалов обшивки был осуществлен по результатам испытаний конструктивных образцов в виде трехслойных сотовых панелей. В качестве наполнителя использовался сотопласт ПСП-1, заложенный в чертеж створки. Программа испытаний, которые проводились в ВИАМ, ЦАГИ и НПО «Молния», включала определение:

- физико-механических характеристик материала комбинированной обшивки (КМУ-4э0,08+СВМ) и материала шпангоута (КМУ-4э0,08) в диапазоне температур $-130 \pm 160^\circ\text{C}$;
- влияния на свойства обшивки рабочего термоциклирования $-130 \pm 160^\circ\text{C}$;
- стабильности свойств углепластика КМУ-4э0,08 типовых схем армирования стенки шпангоутов;
- влияния влажности в сочетании с термоциклированием, имитирующим сезонный ($\pm 60^\circ\text{C}$) и суточный ($\pm 30^\circ\text{C}$) перепады температур;
- несущей способности панелей при температуре 20 и 160°C – при поперечном изгибе с определенной нагрузкой и при сдвиге;
- несущей способности сотового наполнителя при сдвиге при температуре 20 и 160°C ;
- разрушающей нагрузки при неравномерном отрыве обшивки от наполнителя при температуре 20 и 160°C при статическом и повторно-статическом нагружении;
- величины разрушающего напряжения при равномерном отрыве обшивки от наполнителя при температуре 20 и 160°C ;
- выносливости панелей при воздействии вибрационных нагрузок;
- величины разрушающего напряжения при продольном сжатии панелей при температуре 20 и 160°C ;
- теплопроводности панелей.

Результаты проведенных исследований позволили подтвердить работоспособность углепластика КМУ-4э0,08 в качестве наружных слоев обшивки створки в сочетании со средним слоем органика на основе волокон СВМ (ткань артикул 5405/74) и углепластика КМУ-4э0,08 в качестве основного материала для шпангоутов, балок и накладок [5].

В соответствии с уточненными ТУ на детали створки ОПГ однонаправленный углепластик на основе углеродных лент Элур-0,1П и Элур-0,08П должен иметь следующие характеристики:

- $\sigma_{\text{в}} (\sigma_{\text{в,сж}}) \geq 900$ МПа для Элур-0,1П;
- $\sigma_{\text{в}} (\sigma_{\text{в,сж}}) \geq 1000$ МПа для Элур-0,08П.

Более высокий уровень свойств и перспективность использования в деталях створки ОПГ углеродной ленты тонкого номинала Элур-0,08П способствовали принятию технического решения о

применении в первом штатном варианте изделия (и последующих) углепластика КМУ-4э0,08.

Для одного из наиболее нагруженных структурных элементов створки – шпангоута – в соответствии с требованиями ТУ материал должен иметь следующие характеристики:

- для лапок: $\sigma_B (\sigma_{B,сж})=420$ МПа;
- для пояса: $\sigma_B (\sigma_{B,сж})=550$ МПа.

Требования к прочности материала тонколистовой обшивки должны быть согласованы с технологией их изготовления и последующего склеивания с сотами, поэтому одновременно необходимо было решить проблему подготовки поверхности обшивок к склеиванию – обычное зашкуривание в данных условиях было неприемлемо, так как толщина верхнего слоя обшивки составляла всего 0,08 мм при общей толщине обшивки 0,38 мм. Опробованный на опытных деталях створки ОПГ из углепластика КМУ-4л (с температурой формования 160°C) способ подготовки поверхности, заключающийся в тиснении поверхности стеклотканью Т-10-80 через разделительный слой полипропиленовой пленки, оказался также непригод-

ным для деталей из углепластика КМУ-4э0,08 из-за повышенной (до 175°C) температуры его формования. В этом случае полипропиленовая пленка частично впрессовывалась в верхний слой обшивки, что снижало адгезию клея и качество склеивания. Выбор разделительной пленки осложнялся наличием в агрегате створки ОПГ деталей различной конфигурации и из материалов с разной температурой отверждения (175 и 250°C соответственно – для эпоксидного и полиимидного – КМУ-8э0,08 и КМУ-2лп – углепластика). Проведенные исследования 14 вариантов пленок на основе фторопласта, полиимида, полиамида, полиэфира, полиолефина, выбранных совместно с лабораторией термопластичных конструкционных материалов, по антиадгезионным и деформационным свойствам при повышенных температурах, качеству тиснения поверхности углепластиков позволили оценить преимущества и недостатки различных пленок. Пленки ПА-6, ПЭТФ, арилатные и фенилоновая не могут применяться в качестве разделителей при формовании полиимидных углепластиков. Группа фторопластовых пленок давала слабое

Таблица 1

Прочность при растяжении и сжатии гладких и тисненых обшивок

Структура обшивки	Подготовка поверхности	Толщина, мм	Прочность при растяжении				Прочность при сжатии	
			МПа, при температуре испытания, °С					
			+20	+160	+200	-130	+20	+160
КМУ-4э0,08/ СВМ-ткань (арт. 5405)/ КМУ-4э0,08	Гладкая	0,39	413	265	208	406	487	389
	Тиснение (ткань арт. 56208)	0,44	410	325	263	384	466	415
	Тиснение (ткань арт. 56207)	0,45	384	254	–	–	–	–

Таблица 2

Влияние тиснения на прочность склеивания обшивок при равномерном отрыве

Структура обшивки	Вариант тиснения	Прочность склеивания при равномерном отрыве, МПа, при температуре испытания, °С		
		20	150	160
КМУ-4э0,08/ СВМ-ткань (арт. 5405)/ КМУ-4э0,08	Лавсановая ткань (арт. 56208)	13,0	12,7	8,8
	Ткань СВМ (арт. 5302)	14,3	6,3	5,8

Таблица 3

Результаты испытания конструктивных образцов обшивки и шпангоута при растяжении, сжатии и сдвиге

Деталь	Показатель	Значение показателя, МПа				Коэффициент вариации
		Требования по ТУ (среднее значение)	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднее значение	
Обшивка	σ_B	370	365	520	435	9,5
	$\sigma_{B,сж}$	370	306	620	466	7,7
	τ_{12}	140	136	202	164	11,3
Лапка шпангоута*	σ_B	420	427	492	460	8,5
	$\sigma_{B,сж}$	420	518	604	562	10,3
Пояс шпангоута**	σ_B	550	493	567	527	9,7
	$\sigma_{B,сж}$	550	551	628	598	6,6

* Соотношение слоев: [0°] – 44,4%; [$\pm 45^\circ$] – 44,4%; [90°] – 11,2% ([0°], [$\pm 45^\circ$], [90°] – направление выкладки волокон (угл. град).

** Соотношение слоев: [0°] – 58,3%; [$\pm 45^\circ$] – 33,4%; [90°] – 8,3% (см. сноску*).

тиснение от стеклоткани, такие пленки самопроизвольно «отходили» от поверхности углепластика, поэтому не могли служить защитным слоем. Пленки Ф-4МБ и ПМ хорошо передавали тиснение и благодаря хорошим характеристикам отслаивания (соответственно 1,7 и 1,0 Н/см) могут служить защитой поверхности перед склеиванием. Полиимидная пленка с фторопластовым покрытием ПМФБ толщиной 60 мкм оказалась непригодной при формовании окантовки створки ОПГ, так как образовывала заломы и складки глубиной 1–1,5 мм в местах перехода сложного контура детали [6].

Для формования деталей из эпоксидных углепластиков заманчиво было иметь один «жертвенный» слой вспомогательного материала, который одновременно давал бы необходимое тиснение и являлся защитным слоем. Выбор такого слоя был осуществлен в результате исследований конструктивных образцов, изготовленных с применением ткани из волокон СВМ (арт. 5302/73 и 56313) и лавсановой ткани (арт. 56207, 56208, 5354/73) с различными значениями прочности отслаивания: от 1,56 до 7,28 Н/см.

Проведенный комплекс работ по изысканию способов подготовки поверхности деталей створки ОПГ, формование которых проходит при температуре 175°C, позволил разработать, рекомендовать и внедрить в производство способ подготовки поверхности деталей под склеивание клеями ВК-36 и Эластосил 137-175М, заключающийся в тиснении поверхности деталей «жертвенной» лавсановой тканью (арт. 56208) с одновременным обеспечением защиты поверхности от загрязнения этой тканью до момента склеивания.

Результаты исследования влияния выбранного способа подготовки поверхности обшивки створки на прочность при растяжении и сжатии (табл. 1) и при равномерном отрыве (табл. 2 – испытание грибков с двухсторонним тиснением) показали, что применение ткани арт. 56208 практически не оказывает влияния на уровень прочностных характеристик материала обшивки. Это связано с более тонким рельефом тисненной поверхности по сравнению с тиснением тканью арт. 56207, где имеет место снижение прочности при растяжении материала обшивки на 5–7% [7].

Анализ характера разрушения образцов с двухсторонним тиснением, склеенных клеем ВК-36, показал, что нарушения клеевого соединения не наблюдается. Разрушение происходит по углепластику с частичным (10–70%) отслаиванием углепластика от среднего слоя из органита на основе ткани арт. 5405 из волокон СВМ. Результаты испытаний, подтверждающие получение прочности обшивки при равномерном отрыве выше прочности сотового полимерного наполнителя ПСП-1, позволили рекомендовать лавсановую ткань арт. 56208 для применения в качестве «жертвенного» слоя при формовании натуральных деталей створки ОПГ [8].

Для обеспечения качества и стабильности производства деталей створки ОПГ, на «Заводе слоистых пластиков» (г. Санкт-Петербург) было организовано сертифицированное производство препрегов углепластика КМУ-4э0,08. В ОНПО «Технология» отработано изготовление крупногабаритных обшивок и деталей створки ОПГ с рискованным, но оправдавшим себя способом подготовки поверхности под склеивание обшивок с сотовым наполнителем и тепловой защитой. Самая большая опасность таилась в возможности повреждения очень тонкой обшивки при отрыве «жертвенной» ткани с очень большой поверхности (около 300 м²), при этом необходимо учитывать обязательное двухстороннее тиснение верхней обшивки – под склеивание с сотами и с теплозащитой. Правильность принятого решения и надежность разработанной технологии подтвердились успешным изготовлением и полной сборкой четырех комплектов створок. Конечно, были проблемы при отработке технологии и изготовлении из углепластика силового набора створок (балки, шпангоуты), при сборке створок, но это были уже проблемы ниже уровнем, хотя и ставили ВИАМ порой в сложное положение. Например, в Новосибирске при сборке пришлось принимать решение о срочной замене для одного элемента конструкции из углепластика КМУ-2лп на углепластик КМУ-8э [9].

В процессе выполнения этой работы параллельно решались и другие задачи, связанные с усовершенствованием технологии и конструкции створки, к числу которых, прежде всего, относятся: разработка и оптимизация на НПО «Молния» конструкции створки и разработка образцов свидетелей; разработка ТУ на входящие детали; составление методик испытания, а также техдокументации на поставку деталей и комплектацию изделий; отработка технологии ремонтных вариантов – срочную поездку на Байконур специалиста ВИАМ Г.А. Ивановой – основного разработчика технологии снятия «жертвенного» слоя, формирующего тиснение поверхности обшивки углепластика. Были решены вопросы механической обработки и сборки (НИАТ), неразрушающего контроля створки (НИАТ совместно с ВИАМ), разработан специальный крепеж из титанового сплава (КБ «Нормаль», ЦАГИ, ВИАМ, НИАТ) [11]. Кроме того, в ЦАГИ разработаны рекомендации на проведение прочностных и термовакуумных испытаний створки.

В процессе проведения работ достоверность и надежность предварительно полученных результатов подтверждались данными, полученными при испытаниях более двухсот образцов-свидетелей обшивки створки, лапки и пояса шпангоута (табл. 3).

Средние значения показателей прочности материала обшивки при растяжении и сжатии суще-

ственно (на 17–26%) превосходят требования ТУ (см. табл. 3). Что касается показателей прочности материалов лапки и пояса шпангоута, то за исключением прочности при растяжении материала пояса (-4%) все показатели превосходят требования ТУ на 9–33%.

В работе по створке отсека полезного груза в ВИАМ участвовал очень большой коллектив – перечислить всех участников не представляется возможным. В разработку углепластиков наибольший вклад внесли: И.П. Хорошилова, Г.А. Иванова, Г.Г. Козлочкова, Н.Н. Федькова, Г.П. Машинская, З.Ф. Насыбулина, Б.П. Теревенин, М.И. Душин, А.М. Ермолаев, Б.В. Панфилов, Ю.Н. Бузников, Т.Г. Сорина, Б.Г. Браверман, С.Н. Зиновьев, Л.Е. Спичкова, Н.Г. Файзрахманов, К.П. Померанцева, А.И. Сургучёва, Е.В. Ушакова.

В ОКБ «Молния» сотрудники ВИАМ тесно и плодотворно работали с конструкторами створки отсека полезного груза Ю.Л. Елисеевым и Д.К. Чистовым, специалистом по прочности И.Л. Гутманом и ведущим инженером Г.В. Куликовой.

В этой масштабной работе – создании из углепластика створки отсека полезного груза (см. рисунок) – трудно переоценить деятельность сотрудников НПО «Технология»: это, прежде всего, сотрудники лаборатории композиционных материалов В.М. Муратов (начальник лаб.), П.Н. Нейдойнов, Н.В. Выморков, В.А. Летицкая, Н.Б. Волобуева, Д. Нафиков и др.



Общий вид большого транспортного самолета «Буран» со створками отсека полезного груза

Применение углепластика позволило снизить массу конструкции створки отсека полезного груза на 640 кг по сравнению с металлическим аналогом [12].

Разработанная в ВИАМ серия углепластиков на различных наполнителях и полимерных матрицах, а также результаты исследования их конструкционной прочности и эксплуатационной надежности закрыли на три десятилетия потребности большинства производств деталей самолетов (Ил-86, Ил-96-300, Ту-204, Ан-24, Ан-72, Як-42, «Руслан», «Мрия», Миг-29, «Беркут», Бе-200, М-17, спортивных самолетов: Су-26, Су-29, Су-31); планера «Летува»; вертолетов (Ка-32, «Аллигатор»); авиадвигателей (Д-436, Д-18Т, ПС-90); корпусов ракет и обтекателей («Энергия», «Протон»); элементов конструкций спутников и космических станций («Луна», «Венера», «Марс», «Молния», «Комета Галлея»); спортивно-технического инвентаря (многоколенные удилища, клюшки для гольфа, мембраны велосипедных колес, детали яхт, лыжи и лыжные палки, корпуса малых плавсредств и т. д.) [13].

С помощью новых материалов и технологий решаются важные задачи по обеспечению снижения массы авиационной техники и выполнению требований по прочности и жесткости конструкций [14–16].

Известно, что в России сложилась острая ситуация с состоянием железобетонных конструкций инженерных сооружений – мостов, перекрытий, строительных конструкций – в связи с коррозией арматуры в результате длительной эксплуатации без проведения профилактических и ремонтных работ. По подсчетам специалистов количество нуждающихся в ремонте и усилении автомобильных мостов превышает 40 тыс. единиц. Традиционные способы восстановления конструкций с использованием стальной арматуры не всегда эффективны и в ряде случаев не обеспечивают выполнение работ без вывода сооружения из эксплуатации. Для этих целей можно успешно применить технологию усиления конструкций углепластиком. Именно такую работу провела фирма «ИнтерАква» при консультации специалистов ВИАМ по технологии усиления углепластиком железобетонной чаши диаметром более 30 м на обогатительной фабрике в г. Соликамске.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хорошилова И.П., Румянцев А.Ф., Капитонова Т.Р. и др. Конструкционные углепластики на основе углеродных лент и эпоксидных матриц //Авиационная промышленность. 1987. №4. С. 54–57.
2. Хорошилова И.П., Румянцев А.Ф., Козлочкова Г.Г., Федькова Н.Н. и др. Комбинированные композиты и их компоненты на основе связующего ЭНФБ //Авиационная промышленность. 1987. №5. С. 57–59.
3. Гунаев Г.М., Работнов Ю.Н., Румянцев А.Ф., Степанчев Е.Н. и др. Поливолоконистые композиционные материалы //Пластические массы. 1976. №9. С. 31–33.
4. Румянцев А.Ф., Козлочкова Г.Г., Елкина А.Я. Гибридные композиты на основе тканых армирующих наполнителей, содержащие углеродные и стеклянные волокна /В сб. Авиационные материалы. М.: ОНТИ ВИАМ. 1986. С. 25–30.
5. Работнов Ю.Н., Полилов А.Н., Румянцев А.Ф., Гунаев Г.М. и др. Гибридные композиты на основе углеродных и борных волокон /В сб. Авиационные материалы. М.: ОНТИ ВИАМ. 1986. С. 20–24.

6. Румянцев А.Ф., Финогенов Г.С., Бузников Ю.Н., Андреева Т.Г., Осипов П.К. Влияние концентраторов напряжения на прочность углепластиков /В сб. Авиационные материалы. М.: ОНТИ ВИАМ. 1986. С. 45–49.
7. Румянцев А.Ф. Углепластики /В кн.: Армированные пластики. Справочное пособие. М.: МАТИ. 1997. С. 245–263.
8. Румянцев А.Ф., Стреляев В.С., Сачковская Л.Н., Байков В.М. Усталостная прочность конструкционного углепластика /В сб. Динамика, выносливость и надежность авиационных конструкций и систем. М.: МИИГА. 1983. 192 с.
9. Гуняев Г.М., Румянцев А.Ф., Хорошилова И.П., Сорина Т.Г. Конструкционные углепластики /В сб. Авиационные материалы на рубеже XX–XXI веков. М.: ВИАМ. 1994. С. 211–219.
10. Румянцев А.Ф., Бузников Ю.Н., Файзрахманов Н.Г., Деев И.С. Технологические дефекты и их влияние на прочность углепластиков //Авиационная промышленность. 1987. №7. С. 51–53.
11. Мурашов В.В., Гуняев Г.М., Румянцев А.Ф. Использование информативных параметров приборов неразрушающего контроля при диагностике физико-механических свойств углепластиков /В сб. Авиационные материалы и технологии. Вып. Полимерные композиционные материалы. М.: ВИАМ. 2002. С. 70–77.
12. Перов Б.В., Гуняев Г.М., Румянцев А.Ф., Строганов Г.Б. Применение высокомолекулярных полимерных композиционных материалов в изделиях авиационной техники //Авиационная промышленность. 1982. №8. С. 77–80.
13. Доспехи для «Бурана». Материалы и технологии ВИАМ для МКС «Энергия–Буран» /Под общ. ред. акад. РАН Е.Н. Каблова. М.: Фонд «Наука и жизнь». 2013. 128 с.
14. 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.
15. Гращенков Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 231–242.
16. Гуняев Г.М., Чурсова Л.В., Комарова О.А., Гуняева А.Г. Конструкционные углепластики, модифицированные наночастицами //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 277–286.