

УДК 678.747.2

*И.В. Зеленина¹, И.Н. Гуляев¹, А.И. Кучеровский¹, Р.Р. Мухаметов¹***ТЕРМОСТОЙКИЕ УГЛЕПЛАСТИКИ ДЛЯ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-8-8

Рассмотрены термостойкие углепластики марок ВКУ-38ЖН и ВКУ-38ТР на основе фталонитрильного связующего марки ВСН-31 для элементов рабочего колеса центробежного компрессора. Показан высокий уровень сохранения упруго-прочностных свойств углепластиков при температурах 300 и 350°C. Анализ результатов испытаний углепластиков после воздействия тепловлаги и теплового старения показал, что углепластики ВКУ-38ЖН и ВКУ-38ТР обладают высокой устойчивостью к тепловлаге: 74–100% сохранение свойств в сравнении с исходными данными при различных температурах испытаний. Углепластики могут работать длительно при температуре 200°C, 1000 ч – при температуре 300°C и кратковременно (в течение 200 ч) – при температуре 330°C. Комплекс полученных свойств углепластиков ВКУ-38ТР и ВКУ-38ЖН позволяет рекомендовать их в качестве конструкционных материалов для изделий авиационной техники.

Ключевые слова: фталонитрильное связующее, углеродный наполнитель, термостойкий углепластик, центробежный компрессор, кольцо, лопатка.

Heat-resistant CFRP VKU-38ZhN and VKU-38TR on the basis of phthalonitrile binder VSN-31 for elements of the impulse wheel of the centrifugal compressor are considered. High level of preservation of the elastic and strength properties of CFRP is shown at temperatures of 300 and 350°C. The analysis of test results of CFRP after the effect of heat-moisture conditions and heat aging shows that CFRP VKU-38ZhN and VKU-38TR possess high stability to heat-moisture as 74–100% preservation of properties in comparison with initial data at different temperatures of tests and can work for a long time at temperature of 200°C, 1000 h at temperature of 300°C and for a short time (during 200 h) at temperature of 330°C. The complex of the received properties of CFRP VKU-38TR and VKU-38ZhN allows recommending them as structural materials for products of aviation engineering.

Keywords: phthalonitrile binder, carbon filler, heat-resistant CFRP, centrifugal compressor, ring, blade.

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 современной техники невозможно представить без полимерных композиционных материалов (ПКМ). Разработчики авиационной и космической техники давно и широко используют ПКМ и предъявляют высокие требования к их свойствам. Повышенный интерес к этим материалам как в России, так и за рубежом связан с работами по созданию военной и гражданской авиационной и ракетной техники нового поколения, предусматривающими применение ПКМ в теплонагруженных узлах и элементах конструкций [1, 2].

Полимерные композиционные материалы, в частности углепластики, используются не только в планере летательных аппаратов, но и в двигателях [3–5]. За рубежом

работы по изготовлению деталей перспективных двигателей из ПКМ были начаты в конце 80-х годов прошлого века. Так, фирмой General Electric (США) был создан двигатель GE90 с лопатками вентилятора из углепластика, успешно эксплуатируемый на различных типах самолетов гражданской авиации. Аналогичная конструкция лопатки применена фирмой General Electric и для нового семейства двигателей GEEx. Французская фирма Snecma активно ведет разработки по созданию вентилятора ТРДД LEAP X с лопатками из углепластика [6, 7]. Помимо уменьшения массы двигателя применение композиционных материалов способствует повышению характеристик двигателя. Так, в роторном узле в перспективе для вертолетного ГТД применение облегченного рабочего колеса центробежного компрессора (РКЦК) из композиционного материала позволит увеличить ресурс вала и двигателя в целом благодаря снижению нагрузки или снизить их собственную массу.

В России также ведутся работы по внедрению ПКМ в двигатели. ФГУП «ВИАМ» предложена лопатка осевого компрессора из слоистого композиционного материала [8], а ФГУП «ЦИАМ» предложено изготавливать РКЦК из углепластика [9].

Разработка российского двигателя нового поколения, отличающегося от предыдущих двигателей большими скоростями вращения, массовой эффективностью и надежностью, является перспективной задачей [2, 5].

Для вертолетных двигателей третьего поколения с целью повышения их весовой эффективности ставится задача по замене рабочего колеса центробежного компрессора (РКЦК), выполненного из титанового сплава, на РКЦК из полимерных композиционных материалов. Для нового перспективного вертолетного двигателя ФГУП «ЦИАМ» определен облик РКЦК из углепластика на рабочую температуру $>300^{\circ}\text{C}$ и разработан его эскизный проект с учетом армирования элементов и технологии выкладки слоев, а также проведены предварительные расчеты на прочность в поле центробежных сил.

Для обеспечения выполнения поставленной задачи требуются термостойкие углепластики (для колец и для лопаток) с рабочей температурой $>300^{\circ}\text{C}$, поэтому особое внимание привлекают ПКМ с диапазоном рабочих температур от 300 до 400°C и выше [10–17].

Материалы и методы

Для создания термостойких ПКМ требуются тепло- и термостойкие армирующие наполнители и полимерные связующие.

В качестве полимерной матрицы для изготовления термостойких углепластиков для элементов рабочего колеса (кольца и лопатки) разработано термостойкое термореактивное фталонитрильное связующее марки ВСН-31 (ТУ1-595-12-1376–2013). Температура стеклования отвержденного фталонитрильного связующего ВСН-31 лежит в области $>420^{\circ}\text{C}$, температура начала деструкции составляет 520°C . Фталонитрилы являются негорючими материалами, имеют высокие прочностные свойства и малое водопоглощение, а высокотемпературный нагрев отвержденного связующего в атмосфере кислорода воздуха приводит к образованию до 70% кокса [18, 19].

Расплавы фталонитрилов, в частности связующего ВСН-31, имеют низкую вязкость, что позволят применять беспрепегровые технологии (RTM, RFI и VARTM) при изготовлении изделий из ПКМ [20].

В качестве армирующих наполнителей использовали углеродный высококомодульный жгут марки ЖГВ-430-12к с плотностью волокна $1,84\pm 0,03$ г/см³, линейной плотностью 445 текс, разрушающим напряжением при растяжении не менее 4000 МПа, модулем упругости не менее 430 ГПа и равнопрочную углеродную ткань марки УТ-900И (на основе нити Т-800-НВ) шириной 900 мм с поверхностной плотностью 240 г/см²,

которая позволяет получать углепластики с пределом прочности при растяжении по основе и утку не менее 700 МПа и толщиной монослоя $0,20 \pm 0,02$ мм.

Оценку физических свойств углепластиков проводили по ASTM 3771 (определение содержания связующего и наполнителя в препреге и углепластике) и ГОСТ 15139–80 (плотность углепластика).

Механические испытания углепластиков проводили на стандартных образцах при различных температурах: по ГОСТ 25602–80 (сжатие), ГОСТ 25604–82 (статический изгиб), РД-50-675–88 (межслоевой сдвиг) на установке LFM-100 (Швейцария), по ГОСТ 4647–80 (удельная ударная вязкость) на маятниковом копре PSd-№50/15, по ГОСТ 25.601–80 (растяжение) на установке LFM-250. По ОСТ 190094–79 образцы углепластиков испытывали на горючесть (АП 25 Приложение F, часть I) и по ГОСТ 24632–81 – на дымообразование (АП 25 Приложение F, часть V).

Результаты и обсуждение

Силовые кольца для соединения лопаток рабочего колеса центробежного компрессора являются самыми нагруженными и ответственными элементами в конструкции РКЦК из композиционного материала. В деталях кольцевой формы необходимо получить максимально приближенные к теоретическим упруго-прочностные характеристики однонаправленного композиционного материала. Для этого необходимо получить материал с максимальным объемным содержанием волокна вдоль направления армирования и повышенной жесткостью в радиальном направлении. Поэтому для силовых колец в качестве армирующего наполнителя выбран высококомодульный углеродный жгут марки ЖГВ-430-12к.

Основной технологией, позволяющей максимально реализовать высокие упруго-прочностные свойства углеродного волокна, является «сухая» или «мокрая» намотка жгутового армирующего наполнителя на замкнутую кольцевую оправку.

Лопатка рабочего колеса центробежного компрессора имеет сложную рельефную структуру от утолщенной комлевой части до пера лопатки сложной кривизны и должна воспринимать нагрузки под различными углами. Для изготовления такого элемента наиболее подходящей является тканая структура, позволяющая обеспечить армирование в различных направлениях и под разными углами и способная удерживать нити от смещения при пропитке связующим. Тканые структуры также обладают хорошей драпируемостью, что позволяет выкладывать элементы сложной кривизны в технологической оснастке. Для изготовления лопатки выбрана углеродная равнопрочная ткань марки УТ-900И. Термостойкое термореактивное связующее ВСН-31 позволяет получать препреги методом напыления с последующим оплавлением связующего, однако при этом препрег получается жесткий и не подходит для выкладки изделий сложной кривизны, каким является лопаточный элемент рабочего колеса центробежного компрессора. Наиболее подходящей в данном случае может быть технология вакуумной пропитки порошковым связующим сухой заготовки лопатки из углеродной ткани, собранной в технологической оснастке.

Проведены исследования по разработке составов углепластиков и технологий их изготовления. По разработанным технологиям (вакуумной пропитки сухого пакета ткани с последующим формованием для равнопрочного углепластика и намотки на плоскую оправку с последующим формованием для однонаправленного углепластика) изготовлены термостойкие углепластики для элементов конструкции рабочего колеса центробежного компрессора:

– равнопрочный углепластик марки ВКУ-38ТР на основе углеродной ткани УТ-900-И и связующего ВСН-31 для элементов лопатки плотностью $1,56–1,58$ г/см³, толщиной монослоя $0,210 \pm 0,020$ мм и содержанием связующего $34 \pm 2\%$;

– однонаправленный углепластик марки ВКУ-38ЖН на основе углеродного высокомолекулярного наполнителя ЖГВ-430 и связующего ВСН-31 для кольцевых элементов плотностью 1,58–1,60 г/см³, толщиной монослоя 0,255±0,025 мм и содержанием связующего 32±2%.

Основные упруго-прочностные свойства углепластиков ВКУ-38ТР и ВКУ-38ЖН приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Упруго-прочностные свойства углепластика ВКУ-38ЖН

Характеристики	Направление приложения нагрузки, град	Значения характеристик при температуре, °С		
		20	300	350
Предел прочности при растяжении, МПа	0	1300	1270	1250
	90	45	40	36
Модуль упругости при растяжении, ГПа	0	280	250	220
	90	5,2	4,8	4,2
Относительная деформация при растяжении, %	0	0,6	0,6	0,4
	90	0,9	0,8	0,7
Коэффициент Пуассона	0	0,34	–	–
	90	0,02	–	–
Предел прочности при сжатии, МПа	0	670	610	510
	90	69	59	48
Модуль упругости при сжатии, ГПа	0	206	–	–
	90	5,9	–	–
Предел прочности при межслоевом сдвиге, МПа	0	40	32	30
Предел прочности после 2 мес экспозиции в климатической камере, МПа:				
– при сжатии	0	620	530	500*
– при межслоевом сдвиге	0	38	29	23*

* При температуре 330°С.

Таблица 2

Упруго-прочностные свойства углепластика ВКУ-38ТР

Характеристики	Направление приложения нагрузки, град	Значения характеристик при температурах, °С		
		20	300	350
Предел прочности при растяжении, МПа	0	740	700	670
	90	630	630	580
Модуль упругости при растяжении, ГПа	0	88	76	74
	90	88	83	77
Относительная деформация при растяжении, %	0	0,8	0,8	0,7
	90	0,7	0,7	0,7
Коэффициент Пуассона	0	0,06	–	–
	90	0,04	–	–
Предел прочности при изгибе, МПа	0	670	580	490
	90	600	560	460
Модуль упругости при изгибе, ГПа	0	77	72	69
	90	69	67	62
Предел прочности при межслоевом сдвиге, МПа	0	40	31	27
	90	34	31	26
Предел прочности после 2 мес экспозиции в климатической камере, МПа:				
– при изгибе	0	680	510	450*
– при межслоевом сдвиге	0	40	30	26*

* При температуре 330°С.

Помимо исследования упруго-прочностных свойств проведены испытания углепластиков ВКУ-38ЖН и ВКУ-38ТР на устойчивость к воздействию эксплуатационных факторов: тепловлажностное старение в климатической камере при 60°C и $\phi=85\%$ и на тепловое старение при различных температурах. Свойства углепластиков ВКУ-38ЖН и ВКУ-38ТР после 2 мес экспозиции в климатической камере также приведены в табл. 1 и 2.

Сохранение прочностных характеристик углепластика ВКУ-38ЖН в направлении 0 град при температуре 300°C относительно исходных значений (при 20°C) составляет 80–97% в зависимости от вида испытаний, а при температуре 350°C сохранение этих характеристик составляет: прочность при растяжении 96%, модуль упругости при растяжении 78%, прочность при сжатии 76%, прочность при межслоевом сдвиге 75%. Полученные результаты подтверждают, что углепластик ВКУ-38ЖН работоспособен при температуре до 350°C.

В климатической камере при 60°C и $\phi=85\%$ насыщение углепластика влагой до 0,5% происходит в первые 20 сут, в дальнейшем наблюдается равномерный прирост до достижения равновесного влагонасыщения (60 сут), составляющего 0,58%. При этом сохранение свойств углепластика ВКУ-38ЖН после 2 мес экспозиции в климатической камере относительно исходных значений прочности при температуре испытаний 20°C составляет: при сжатии 93% и при межслоевом сдвиге 95%, при температуре испытаний 300°C – при сжатии 93% и при межслоевом сдвиге 90%, при температуре испытаний 330°C – при сжатии 93% и при межслоевом сдвиге 74%.

Сохранение прочностных характеристик углепластика ВКУ-38ТР в направлении 0 град при температуре 300°C относительно исходных значений (при 20°C) составляет 79–94% в зависимости от вида испытаний, а при температуре 350°C сохранение этих характеристик составляет: прочность при растяжении 90%, модуль упругости при растяжении 84%, прочность при межслоевом сдвиге 69%, прочность при изгибе 73%, модуль упругости при изгибе 89%.

Полученные результаты подтверждают, что углепластик ВКУ-38ТР работоспособен при температуре до 350°C.

В климатической камере при 60°C и $\phi=85\%$ насыщение углепластика влагой до 0,76% происходит в первые 20 сут, в дальнейшем наблюдается равномерный прирост до достижения равновесного влагонасыщения (50 сут), составляющего 0,8%. При этом сохранение прочности углепластика ВКУ-38ТР после 2 мес экспозиции в климатической камере относительно исходных значений при температуре испытаний 20°C при статическом изгибе и межслоевом сдвиге составляет 100%, при температуре испытаний 300°C – предел прочности при статическом изгибе 88%, предел прочности при межслоевом сдвиге 97%, а при температуре испытаний 330°C – предел прочности при статическом изгибе 78%, предел прочности при межслоевом сдвиге 96%.

Недостатком известных отечественных и зарубежных углепластиков на основе термостойких фталонитрильных связующих, ограничивающим область их применения, является сравнительно невысокая стойкость к термоокислительной деструкции, т. е. материалы не выдерживают длительного воздействия в диапазоне повышенных рабочих температур 300–400°C, причем чем выше температура воздействия на материал, тем интенсивнее протекает процесс термической деструкции. Для оценки эксплуатационной надежности необходимо исследовать свойства углепластиков при длительном изотермическом старении при различных температурах, так как РКЦК из углепластиков ВКУ-38ЖН и ВКУ-38ТР должно работать в широком температурном диапазоне от -50 до +300°C с возможными кратковременными забросами температур до 330–350°C.

Тепловое старение углепластиков ВКУ-38ТР и ВКУ-38ЖН проводили при температурах 200, 300 и 330°C. Влияние температуры на углепластики оценивали как по

изменению прочностных свойств, так и по потере массы образцов. При температуре экспозиции 200°C в течение 2000 ч не наблюдалось потери массы и падения свойств углепластиков ВКУ-38ЖН (предел прочности при растяжении и межслоевом сдвиге) и ВКУ-38ТР (предел прочности при статическом изгибе и межслоевом сдвиге).

На рис. 1 приведены кривые изменения свойств (предел прочности при растяжении и межслоевом сдвиге) углепластика ВКУ-38ЖН после теплового старения при температуре 300°C. При тепловом старении образцов углепластика ВКУ-38ЖН уровень сохранения свойств от исходных значений после 750 и 1000 ч экспозиции составляет: при температуре испытаний 20°C – прочность при растяжении 77 и 63%, прочность при межслоевом сдвиге 73 и 62%; при температуре испытаний 300°C – прочность при растяжении 69 и 62% и прочность при межслоевом сдвиге 71 и 66%. Потеря массы углепластика ВКУ-38 ЖН при этом составляет 2,02 (750 ч) и 2,56% (1000 ч).

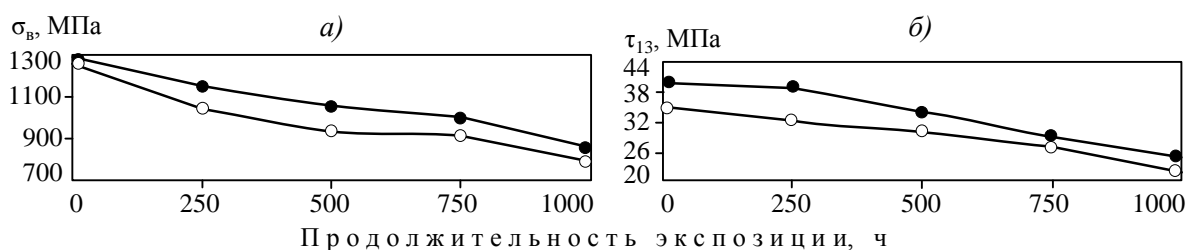


Рис. 1. Изменение пределов прочности при растяжении (а) и при межслоевом сдвиге (б) углепластика ВКУ-38ЖН в зависимости от продолжительности теплового старения при температуре испытания 20 (●) и 300°C (○)

После экспозиции при температуре 330°C в течение 200 ч при температуре испытаний 20°C сохранение прочности при растяжении составляет 79%, прочности при межслоевом сдвиге 75%, а при температуре испытаний 330°C сохранение прочности при растяжении составляет 74%, прочности при межслоевом сдвиге 84%. Потеря массы при этом составляет 1,6% (200 ч).

На рис. 2 приведены кривые изменения свойств (предел прочности при статическом изгибе и межслоевом сдвиге) углепластика ВКУ-38ТР после теплового старения при температуре 300°C. При тепловом старении образцов углепластика ВКУ-38ТР уровень сохранения свойств от исходных значений после 750 и 1000 ч экспозиции составляет: при температуре испытаний 20°C – прочность при статическом изгибе 74 и 65%, прочность при межслоевом сдвиге 82 и 75%; при температуре испытаний 300°C – прочность при статическом изгибе 83 и 65% и прочность при межслоевом сдвиге 85 и 70%. Потеря массы образцов углепластика ВКУ-38ТР при этом составляет 1,47 (750 ч) и 2,18% (1000 ч).

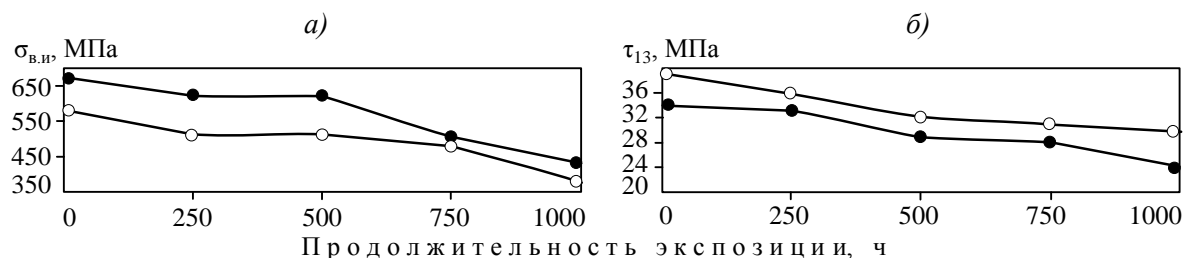


Рис. 2. Изменение предела прочности при статическом изгибе (а) и межслоевом сдвиге (б) углепластика ВКУ-38ТР в зависимости от продолжительности теплового старения при температуре испытания 20 (●) и 300°C (○)

После экспозиции при температуре 330°C в течение 200 ч при температуре испытаний 20°C сохранение прочности при статическом изгибе и межслоевом сдвиге составляет 74%, а при температуре испытаний 330°C сохранение прочности при статическом изгибе составляет 76% и прочности при межслоевом сдвиге 84%. Потеря массы при этом составляет 1,22% (200 ч).

Уровень сохранения свойств после теплового старения позволяет утверждать, что углепластики ВКУ-38ЖН и ВКУ-38ТР могут работать длительно (>2000 ч) при температуре 200°C, до 1000 ч – при температуре 300°C и кратковременно (до 200 ч) – при температуре 330°C.

Исследования углепластиков ВКУ-38ЖН и ВКУ-38ТР на пожарную безопасность показали, что углепластики по горючести являются трудносгорающими, а по дымообразованию относятся к II категории (слабодымящие). Полученные результаты подтверждаются данными, описывающими фталонитрильные углепластики как материалы, обладающие высокими упруго-прочностными характеристиками и удовлетворяющие по огнестойкости требованиям военного стандарта флота MIL-STD-2031 для подводных лодок [21].

Комплекс полученных свойств углепластиков ВКУ-38ТР и ВКУ-38ЖН позволяет рекомендовать их не только для изготовления элементов рабочего колеса центробежного компрессора, но и для других теплонагруженных деталей и авиационных конструкций. Углепластик марки ВКУ-38ЖН может быть использован в теплонагруженных деталях и авиационных конструкциях, изготавливаемых методом намотки (втулки, каналы, трубопроводы для топлива и смазок, баллоны высокого давления и другие тела вращения), углепластик марки ВКУ-38ТР – для изготовления теплонагруженных деталей и агрегатов в конструкциях планера в зоне двигателя.

Заключение

Разработаны термостойкие углепластики на основе фталонитрильного связующего ВСН-31 и углеродных наполнителей: равнопрочной ткани – углепластик ВКУ-38ТР и высокомодульного жгута – углепластик ВКУ-38ЖН для элементов рабочего колеса центробежного компрессора.

Сохранение прочностных характеристик углепластика ВКУ-38ЖН в направлении 0 град при температуре 300°C относительно исходных значений (при 20°C) составляет 80–97% в зависимости от вида испытаний, а при температуре 350°C сохранение этих характеристик составляет 75–96%. Сохранение прочностных характеристик углепластика ВКУ-38ТР в направлении 0 град при температуре 300°C относительно исходных значений (при 20°C) составляет 79–94% в зависимости от вида испытаний, а при температуре 350°C сохранение этих характеристик составляет 69–90%. Полученные результаты подтверждают, что углепластики ВКУ-38ЖН и ВКУ-38ТР работоспособны при температуре до 350°C.

Анализ результатов испытаний углепластиков после воздействия тепловлаги (экспозиция в климатической камере) и теплового старения в сравнении с исходными данными показал, что углепластики ВКУ-38ЖН и ВКУ-38ТР обладают высокой устойчивостью к тепловлаге (74–100% сохранение свойств при различных температурах испытаний) и могут работать длительно при температуре 200°C (>2000 ч), при температуре 300°C – в течение 1000 ч и кратковременно – при температуре 330°C в течение 200 ч.

Комплекс полученных свойств углепластиков ВКУ-38ТР и ВКУ-38ЖН: высокий уровень упруго-прочностных свойств и сохранение их при повышенной температуре, пожаробезопасность, устойчивость к тепловлажностному воздействию – позволяет рекомендовать их в качестве конструкционных материалов для изделий авиационной техники.

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. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // *Металлы Евразии*. 2012. №3. С. 10–15.
3. Семейство ТРДД Trent / В сб. Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний по созданию перспективных авиационных двигателей. М.: ЦИАМ. 2004. 422 с.
4. Каримбаев Т.Д., Луппов А.А., Афанасьев Д.В. Рабочие лопатки вентиляторов для перспективных двигателей // *Двигатель*. 2011. №6. С. 2–10.
5. Каблов Е.Н., Салибеков С.Е., Абузин Ю.А., Рыльников В.С., Турченков В.А., Каримбаев Т.Д., Луппов А.А. Конструктивные и технологические решения для создания составных лопаток перспективных вентиляторов с применением прочных и жестких металлокомпози- тов / В сб.: Новые технологические процессы и надежность ГТД. Вып. 3. Композиционные и керамические материалы в ГТД. М.: ЦИАМ, 2003. С. 124–139.
6. Turbomachine blade made of composite material: pat. 5672417 US; publ. 30.09.97.
7. Turbomachine blade, in particular a fan blade, and its method of manufacture: pat. 7241112 US; publ. 10.07.07.
8. Лопатка осевого компрессора: пат. 2187715 Рос. Федерации; опубл. 20.08.02.
9. Рабочее колесо центробежного компрессора из композиционного материала и способ его изготовления: пат 2239100 Рос. Федерации; опубл. 27.04.04.
10. Domingues D.D., Jones H.N., Keller T.M. The effect of curing additive on the mechanical properties of phthalonitrile-carbon fiber composites // *Polymer Composites*. 2004. V. 25. №5. P. 554–561.
11. Phthalonitrile composites: pat. 7642336 US; publ. 05.01.10.
12. Кузнецов А.А., Семенова Г.К. Перспективные высокотемпературные терморезистивные связующие для полимерных композиционных материалов // *Российский химический журнал*. 2009. Т. LIII. №4. С. 86–96.
13. Раскутин А.Е., Панина Т.В. Проблемы создания конструкционных углепластиков с повышенной термоокислительной стойкостью / В сб. *Авиационные материалы и технологии: науч.-технич. сб.* М.: ВИАМ, 2002. №3. С. 18–23.
14. 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.
15. Давыдова И.Ф., Раскутин А.Е., Мухаметов Р.Р. Новые стекло- и углепластики на основе термостойкого связующего / В кн. 75 лет. *Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: юбилейный науч.-технич. сб.* М.: ВИАМ, 2007. С. 285–289.
16. Гуляев И.Н., Власенко Ф.С., Зеленина И.В., Раскутин А.Е. Направления развития термостойких углепластиков на основе полиимидных и гетероциклических полимеров // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2014. №1. Ст. 04. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 15.06.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-1-4-4.
17. Гуняев Г.М., Каблов Е.Н., Алексашин В.М. Модифицирование конструкционных углепластиков углеродными наночастицами // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. №1. С. 5–11.
18. Железняк В.Г., Мухаметов Р.Р., Чурсова Л.В. Исследование возможности создания терморезистивного связующего на рабочую температуру до 400°C // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №S2. С. 58–61.
19. Полимерное связующее и препреги на его основе: пат. 2510408 Рос. Федерация; опубл. 27.03.14.
20. Zhou Liu, Li Sun Zhao. Study of a High-Temperature Resistant Phthalonitrile Resin Suitable for RTM // *Processing at Low Temperatures: 44th ISTC*. Charleston. 2012.
21. Sastri S., Satya B., Armistead J.P., Keller T.M., Sorathia U. Flammability characteristics of phthalonitrile composites edge / In: *Evolving technologies for the competitive edge*. Anakheym. 1997. P. 1032–1038.