

УДК 678.747.2

А.А. Евдокимов<sup>1</sup>, И.Н. Гуляев<sup>1</sup>, А.В. Начаркина<sup>1</sup>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБЪЕМНО-АРМИРОВАННОГО УГЛЕПЛАСТИКА

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-66-73

*Исследованы физико-механические свойства углепластика, изготовленного с применением объемно-армированной преформы ортогонального типа плетения и связующего ВСН-31 при комнатной и повышенной (300 °С) температурах. Представленные результаты исследований приведены в сравнении с углепластиком, изготовленным на основе равнопрочной ткани и связующего ВСН-31. Проведен анализ полученных результатов сравниваемых углепластиков и сделаны выводы об их работоспособности при повышенной температуре. Объяснено влияние ориентации основы, утка и вертикального перевязочного жгута на физико-механические характеристики углепластиков.*

**Ключевые слова:** углепластик, объемно-армированная преформа, ортогональный тип плетения, физико-механические характеристики, рабочее колесо центробежного компрессора, вертолетный двигатель.

А.А. Evdokimov<sup>1</sup>, I.N. Gulayev<sup>1</sup>, A.V. Nacharkina<sup>1</sup>

## INVESTIGATION OF THE PHYSICOMECHANICAL PROPERTIES OF VOLUME-REINFORCED CARBON FIBER REINFORCED PLASTIC

*The physical and mechanical properties of carbon fiber made using a volume-reinforced preform of the orthogonal weave type and a binder VSN-31 at room and elevated (300 °C) temperatures are investigated. The presented research results are presented in comparison with carbon fiber, made on the basis of equal-strength fabric and binder VSN-31. The analysis of the obtained results of the compared carbon fiber plastics is carried out and conclusions are made about their performance at high temperature. The influence of the orientation of the base, weft, and vertical ligation bundles on the physical and mechanical characteristics of carbon fiber plastics is explained.*

**Keywords:** carbon fiber reinforced plastic, volume-reinforced preform, orthogonal type of weaving, physical and mechanical characteristics, centrifugal compressor impeller, helicopter engine.

---

<sup>1</sup>Федеральное 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

В настоящее время в мировом авиастроении наметился тренд на изготовление ответственных узлов и агрегатов воздушных судов из полимерных композиционных материалов (ПКМ) с использованием объемно-армированных тканых преформ на основе углеродных и стеклянных волокон [1–3]. Следует отметить применение тканых преформ прежде всего для изготовления лопаток вентилятора авиационного газотурбинного двигателя (ГТД) фирмами General Electric (США) и Snecma (Франция) применительно к двигателю LEAP-X [4]. Отличительной особенностью лопатки, изготовленной из ПКМ, полученного с применением тканых преформ, по сравнению с лопаткой, изготовленной из ПКМ, полученного ручной выкладкой препрега с последующим автоклавным формованием, является то, что первая в гораздо меньшей степени склонна

к возникновению на ее поверхности дефектных областей вследствие расслоения, а также имеет большую стойкость к ударным нагрузкам. Это объясняется лучшими характеристиками ПКМ, полученного с применением тканых преформ, по толщине вследствие ориентации армирующих волокон в объеме изделия, что в конечном итоге приводит к увеличению стойкости при попадании сторонних предметов [5].

Российские предприятия также проводят работы по внедрению ПКМ, изготовленных с использованием тканых преформ, в изделия авиационной техники [6–8]. В частности, во ФГУП «ВИАМ» разработан углекомпозит для изготовления лопаточного элемента рабочего колеса центробежного компрессора (РКЦК) из ПКМ с рабочей температурой до 300 °С для применения в перспективном вертолетном двигателе. Для обеспечения требований, предъявляемых к несущей способности разрабатываемого двигателя, необходимо в том числе, чтобы коэффициент полезного действия РКЦК из ПКМ составлял не менее 70%. Согласно газодинамическим расчетам, частота вращения ротора двигателя должна превышать 40000 об/мин. Кроме того, эксплуатацию таких двигателей планируют во всеклиматических условиях, поэтому требования к материалам конструкции и технологиям их сборки, в том числе и к материалу РКЦК, особые. Еще одним условием работы конструкции РКЦК является неизменность ее геометрических параметров в процессе эксплуатации, что также устанавливает особые требования по обеспечению жесткости к применяемому углепластику. Следовательно, изготовление тканой преформы и последующее формование углепластика и элемента лопатки из него осуществляют из углеродных волокон высокой прочности и жесткости.

Для обеспечения требований, предъявляемых к характеристикам углепластика, необходимо в первую очередь определить схему расположения армирующих волокон в преформе. При разработке углекомпозита, исходя из имеющейся в настоящее время технологической возможности по изготовлению объемно-армированных преформ, предпочтение отдали наиболее подходящим типам плетения – сатиновому и ортогональному, а для обеспечения требуемой температуры эксплуатации конструкции (до 300 °С) выбрали высокотемпературное связующее ВСН-31. После исследования характеристик полученных видов углепластиков выявили, что углекомпозит, изготовленный с применением объемно-армированной преформы ортогонального плетения, лучше, чем углепластик, изготовленный с применением объемно-армированной преформы сатинового плетения, и в большей степени подходит для формования из него элемента лопатки РКЦК [9]. Для полного понимания особенностей поведения материала при работе конструкции требуется более тщательное исследование его физико-механических свойств [10]. В данной статье представлены результаты проведенного исследования.

### Материалы и методы

Для выполнения необходимого условия работоспособности материала РКЦК – обеспечения требуемой температуры эксплуатации до 300 °С – при разработке углекомпозита применяли фталонитрильное связующее в виде порошка марки ВСН-31, работы с которым успешно велись и ранее. Это связующее способно обеспечить температуру эксплуатации углепластиков, изготовленных с его применением, до 300–320 °С [11–13].

Для удовлетворения предъявляемых к углепластику требований по обеспечению стабильных геометрических параметров при высокой частоте вращения, согласно проведенным расчетам мезообъема материала, необходимо использование углеродных жгутов со следующими характеристиками при растяжении: пределом прочности  $\sigma_b \geq 4500$  МПа и модулем упругости  $E \geq 200$  ГПа. Основным параметром для обеспечения жесткости конструкции РКЦК является модуль упругости углекомпозита, во многом

определяющийся модулем упругости углеродных волокон, из которых изготавливают наполнитель (преформу) [14, 15]. При проведении работ применяли среднемодульные углеродные жгуты ( $\sigma_b \geq 5200$  МПа,  $E \geq 250$  ГПа,  $\varepsilon \approx 1,9\%$ ) марок T800HV фирмы Torayca (Япония) и SYT-55S фирмы Zhangfu Sheenyng (КНР). Для изготовления объемно-армированных полотен, необходимых для исследования углепластика ВКУ-38ТП, выбрали углеродный жгут SYT-55S номиналом 12К в связи с большей его доступностью на российском рынке вследствие введения зарубежных санкций.

Ортогональная структура преформы подразумевает расположение основной каркасной и уточной нитей под углом 90 градусов друг к другу. Таким образом, на ткацком оборудовании выкладывается необходимое для формования ПКМ количество слоев, которые прошивают перевязочной вертикальной нитью, расположенной под углом 90 градусов к основным и уточным нитям, через все слои (рис. 1). Благодаря такой структуре удается максимально реализовать свойства жгута в углекомposite, отформованном на его основе.

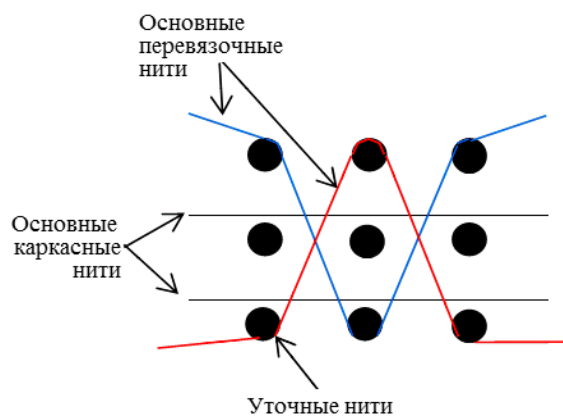


Рис. 1. Схема переплетения преформы ортогонального типа

Основные характеристики преформы ортогонального плетения представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Основные характеристики преформ ортогонального плетения**

Показатели	Значения показателей
Толщина преформы при удельной нагрузке 1 кН/м <sup>2</sup> , мм	3,31
Количество каркасных слоев основы	6
Количество нитей каркасной основы в слое, нитей/100 мм	30
Общее количество нитей каркасной основы, нитей/100 мм	180
Общее количество нитей перевязочной основы, нитей/100 мм	30
Количество слоев по утку	7
Количество уточных нитей в слое, нитей/100 мм	44
Общее количество уточных нитей, нитей/100 мм	308

Для исследования физико-механических свойств углепластика ВКУ-38ТП изготовили ортогональные полотна толщиной 4 и 6 мм, из которых в свою очередь изготовили плиты углепластика с помощью отработанного ранее метода поперечной вакуумной пропитки. Данная технология включает сборку пакета-заготовки из тканой преформы с последующей посыпкой связующим (в количестве 0,9:1 по массе преформы) и размещение пакета-заготовки в термошкафу, где под вакуумом его нагревают до температуры перехода связующего в вязкотекучее состояние. При таком переходе изменяются реологические свойства, благодаря чему под действием вакуума в пакете-заготовке происходит

пропитка углеродной преформы связующим. Далее в процессе изготовления углепластика температуру и давление повышают по ступенчатому режиму.

При формовании углепластика на основе связующего ВСН-31 температурный режим подбирали исходя из показателей изотермической вязкости, полученных при температуре стеклования связующего 200 °С (кривая на рис. 2). Установлено, что вязкость связующего остается неизменной (до 2,5 Па·с) в течение 40–45 мин, а после 50 мин начинает интенсивно расти. Таким образом, в процессе формования углепластика за 45 мин необходимо провести пропитку и формообразование.

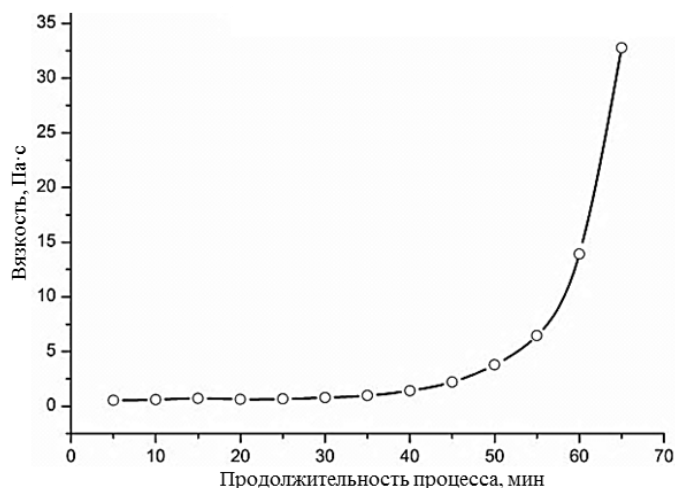


Рис. 2. Изотермическая вязкость связующего ВСН-31 при температуре 200 °С

В результате отформовали плиты углепластика ВКУ-38ТП толщиной 2,5 и 4 мм, из которых вырезали образцы для определения характеристик при растяжении, ударной вязкости по Шарпи и предела прочности при сжатии после удара.

Физико-механические характеристики углепластиков исследованы в соответствии со следующими стандартами: ГОСТ 25.601–80, ASTM D5379, ASTM D6641-14, ГОСТ 15139–69, ГОСТ Р 56785–2015, ГОСТ 4647–2015, СТО 1-595-30-409–2011.

### Результаты и обсуждение

В табл. 2 представлены упруго-прочностные характеристики при растяжении углепластиков ВКУ-38ТП и ВКУ-38ТР на основе равнопрочной ткани из углеродного волокна Т800 и связующего ВСН-31, полученные при температурах 20 и 300 °С.

Таблица 2

**Упруго-прочностные характеристики при растяжении углепластиков ВКУ-38ТР и ВКУ-38ТП при температурах 20 и 300 °С**

Свойства	Направление приложения нагрузки, градус	Значения свойств для углепластиков при температуре, °С			
		20		300	
		ВКУ-38ТР	ВКУ-38ТП	ВКУ-38ТР	ВКУ-38ТП
Предел прочности, МПа	0	740	635	700	580
	90	630	938	630	950
Модуль упругости, ГПа	0	88	50	76	54
	90	88	69	84	69
Относительное удлинение при разрыве, %	0	0,8	1,2	0,9	1,2
	90	0,7	1,2	0,7	1,3
Коэффициент Пуассона	0	0,06	0,03	–	–
	90	0,04	0,01	–	–

Видно, что предел прочности при растяжении у углепластика ВКУ-38ТП по основе меньше, чем по утку, как при 20 °С, так и при 300 °С. Причем при 20 °С превышение составляет 48%, а при 300 °С: 64%. У углепластика ВКУ-38ТР предел прочности при растяжении по основе превышает предел прочности по утку при 20 °С на 17%, а при 300 °С – на 11%. Этот факт можно объяснить структурой расположения армирующих углеродных волокон в материале. Волокна, расположенные в преформе по утку (вследствие особенностей технологии ее изготовления), имеют прямую вытянутую структуру, в результате чего удается максимально реализовать их потенциал с точки зрения упруго-прочностных свойств. Волокна, расположенные в преформе по основе (вследствие особенностей технологии изготовления объемно-армированных тканых преформ), огибают как уточные волокна, так и перевязочную вертикальную основу, изгибаясь в двух плоскостях, в результате чего не получается достичь свойств, реализуемых в направлении утка. Углепластик ВКУ-38ТР, будучи изготовленным с применением равнопрочной ткани, имеет характеристики по основе несколько больше, чем по утку. Это обстоятельство объясняется стандартной технологией изготовления равнопрочных тканей на современных ткацких станках, которая подразумевает прямые неизогнутые волокна основы и переплетенные между ними волокна утка. Подобная структура плетения характеризуется большей прочностью по основе, чем по утку (на ~10%), что и наблюдают у углепластика ВКУ-38ТР как при 20 °С, так и при 300 °С.

Сохранение значений предела прочности при растяжении при 300 °С относительно значений при 20 °С у углепластика ВКУ-38ТП по основе составляет 91%, а по утку 100%. У углепластика ВКУ-38ТР наблюдается сохранение значений предела прочности при растяжении по основе 95%, а по утку 100%. Это подтверждает термостойкость применяемого для изготовления углепластиков связующего ВСН-31.

Следует также отметить, что значения коэффициента Пуассона у образцов углепластика ВКУ-38ТП близки к нулю как по основе, так и по утку, а у образцов углепластика ВКУ-38ТР оказались незначительно больше. Это можно объяснить влиянием перевязочной вертикальной основы на способность материала устойчиво держать свою форму при начальных этапах нагружения.

Значение модуля упругости при растяжении углепластика ВКУ-38ТП оказалось также ожидаемо больше в направлении утка. Так, при 20 °С разница составила 38%, а при 300 °С: 28%. Значения, полученные при температуре 300 °С, приблизительно одинаковые по сравнению со значениями, полученными при 20 °С по основе (увеличение на 8%), а по утку наблюдается полное соответствие модулю упругости. У образцов углепластика ВКУ-38ТР наблюдается полное соответствие значений модуля упругости при растяжении при 20 °С по основе и утку (88 ГПа) с незначительным падением при 300 °С (14% по основе и 5% по утку). Это свидетельствует о термо- и размеростабильности углепластика ВКУ-38ТП при 300 °С.

Далее сравним значения относительного удлинения при растяжении испытанных образцов углепластиков. Так, образцы углепластика ВКУ-38ТР имели удлинение ~(0,7–0,9)% вне зависимости от температуры испытаний; образцы углепластика ВКУ-38ТП: ~(1,2–1,3)% как по основе, так и по утку. Большие значения удлинения при растяжении можно объяснить наличием внутренних напряжений в материале, возникающих вследствие разных значений температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) у матрицы и углеродного волокна в преформе. Углеродное волокно обладает близким к нулю значением ТКЛР, в то время как ТКЛР матрицы равен  $27 \text{ K}^{-1}$  при 20 °С. В процессе охлаждения материала после формования углепластика ВКУ-38ТП происходит большая усадка матрицы, чем волокна. В результате возникают растягивающие напряжения в матрице материала и сжимающие напряжения – в волокне.

Сжимающие напряжения в углеродном волокне в наибольшей степени проявляются в преформе, так как ее прошивные нити дополнительно фиксируют нити основы и утка в материале. При приложении нагрузки к образцам, по-видимому, сначала возникает релаксация сжимающих напряжений в углеродных волокнах, а только потом непосредственно само их растяжение. Следствием этого эффекта является увеличение показателей удлинения при растяжении углепластика ВКУ-38ТП по сравнению с углепластиком ВКУ-38ТР.

Разницу в значениях ТКЛР волокна и матрицы в углепластике ВКУ-38ТП можно объяснить не только увеличением относительного удлинения при растяжении, но и увеличением прочности при растяжении относительно расчетных значений. Так, согласно расчету прочности при растяжении углепластика ВКУ-38ТП (производимому по правилу смеси и с учетом объемного содержания волокон в углепластике (табл. 1)), значения по основе должны быть ~529 МПа, а по утку ~900 МПа, в то время как истинные значения этих показателей оказались больше на 20 и 4% соответственно. Увеличение истинных значений по основе (на 20%) можно объяснить еще и тем, что при приложении нагрузки волокна, будучи искривленными, принимают вытянутое положение, за счет чего происходит релаксация напряжений, не учитываемая при теоретическом расчете прочности. Растянутые же при изготовлении преформы уточные волокна показали значения, близкие к расчетным, что свидетельствует о правильности применения метода расчета прочности при растяжении.

Еще одним интересным результатом данного исследования является прочность при сжатии после удара с энергией 6,7 Дж/мм углепластика ВКУ-38ТП и его ударная вязкость по Шарпи (без надреза), значения которых приведены в табл. 3 в сравнении со значениями для углепластика ВКУ-38ТР.

Таблица 3

**Ударная вязкость по Шарпи (без надреза) и предел прочности при сжатии после удара углепластиков ВКУ-38ТП и ВКУ-38ТР при 20 °С**

Свойства	Направление приложения нагрузки, градус	Значения свойств* углепластика	
		ВКУ-38ТП	ВКУ-38ТР
Ударная вязкость по Шарпи (без надреза), кДж/м <sup>2</sup>	0	<u>95–120</u> 105	<u>111–140</u> 130
	90	<u>137–247</u> 176	<u>116–140</u> 130
Предел прочности при сжатии после удара с энергией 6,7 Дж/мм, МПа	0	<u>80–115</u> 100	–

\* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

Установлено, что удельная ударная вязкость по Шарпи углепластика ВКУ-38ТП в направлении утка больше, чем в направлении основы, на 68%. Это можно объяснить прямым расположением волокон по утку в преформе, по сравнению с изогнутым расположением волокон по основе вследствие технологических особенностей ее изготовления. Таким образом, можно выявить прямую зависимость ударной вязкости от степени ориентации волокна в материале: углепластик ВКУ-38ТП в направлении основы имеет минимальные значения ударной вязкости и в то же время наиболее изогнутое расположение армирующих волокон; в направлении утка – наибольшие показатели ударной вязкости и наилучшую степень ориентации волокон. У образцов углепластика ВКУ-38ТР наблюдаются практически одинаковые значения ударной вязкости и по основе, и по утку вследствие равнопрочной структуры армирования материала. В данном случае переплетение волокон утка между волокнами основы не повлияло на прочностные характеристики.

Предел прочности при сжатии после удара с энергией 6,7 Дж/мм углепластика ВКУ-38ТП, характеризующий остаточную прочность материала, равен 29% от первоначальной прочности материала при сжатии при 20 °С. Следует отметить, что при испытаниях по определению остаточной прочности после удара не происходило хрупкого разрушения исследуемых образцов. Наблюдали лишь частичный наклон образцов в месте нанесения удара вертикально падающим капром с сохранением их целостности вследствие нагрузки на них со стороны торца образца траверсой испытательной машины. После снятия нагрузки происходило восстановление изначальной геометрической формы образца. Таким образом, однозначно оценить параметр остаточной прочности при сжатии после удара с энергией 6,7 Дж/мм не представляется возможным. Поэтому исследования остаточной прочности при сжатии после удара углепластика ВКУ-38ТП необходимо проводить дополнительно.

### Заключения

Проведено исследование физико-механических характеристик углепластика ВКУ-38ТП на основе объемно-армированной преформы ортогонального типа плетения из углеродных волокон SYT-55S номиналом 12К и связующего ВСН-31 в сравнении с аналогом – углепластиком ВКУ-38ТР на основе равнопрочной ткани УТ-900-И из углеродного жгута марки Toray T800 и связующего ВСН-31.

Выявлено, что углепластик ВКУ-38ТП может работать в интервале температур до 300 °С. Уменьшение значений прочностных характеристик при этом составляет не более 9%. Отличительной особенностью углепластика ВКУ-38ТП является то, что он обладает лучшими физико-механическими характеристиками в направлении утка, чем по основе (на 47%). Это объясняется особой технологией изготовления преформы ортогонального типа, имеющей прямую вытянутую структуру уточных волокон, вследствие чего максимально реализуется их потенциал с точки зрения упруго-прочностных свойств в этом направлении. Волокна же, расположенные в преформе по основе,гибают как уточные волокна, так и перевязочную вертикальную основу, изгибаясь в двух плоскостях, вследствие чего не получается достичь свойств, реализуемых в направлении утка.

Углепластик ВКУ-38ТР, будучи изготовленным с применением равнопрочной ткани, имеет характеристики по основе на ~10% больше, чем по утку, что также можно объяснить технологией изготовления равнопрочных тканей на современных ткацких станках, при которой используют прямые неизогнутые нити основы и переплетенные между ними нити утка.

Таким образом, можно сделать вывод, что разработанный углепластик ВКУ-38ТП в направлении основы несколько уступает углепластику аналогичного применения ВКУ-38ТР, а в направлении утка превосходит его. Данное обстоятельство следует учитывать при проектировании конструкций из углепластика ВКУ-38ТП в будущем. Результаты испытаний по определению предела прочности при сжатии после удара углепластика ВКУ-38ТП не позволили сделать однозначный вывод о его стойкости к ударным нагрузкам, поэтому данные исследования необходимо проводить дополнительно.

### Библиографический список

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. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

2. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // *Металлы Евразии*. 2015. №1. С. 36–39.
3. Каблов Е.Н. Россия на рынке интеллектуальных ресурсов // *Эксперт*. 2015. № 28 (951). С. 48–51.
4. Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Раскутин А.Е., Дун В.А. Углепластик на основе объемно-армирующей триаксиальной плетеной преформы // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2019. №1 (73). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.12.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-55-63.
5. Белинис П.Г., Донецкий К.И., Лукьяненко Ю.В., Рогожников В.Н., Майер Ю., Быстрикова Д.В. Объемно-армирующие цельнотканые преформы для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. №4 (57). С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-18-26.
6. Композитная лопатка вентилятора с многослойным армирующим материалом: пат. 2384749 Рос. Федерация; заявл. 11.11.08; опубл. 20.03.10.
7. Новиков А.С., Каримбаев Т.Д. Рабочие лопатки вентиляторов большой степени двухконтурности для перспективных ТРДД // *Двигатель*. 2015. №5 (101). С. 6–11.
8. Зеленина И.В., Гуляев И.Н., Кучеровский А.И., Мухаметов Р.Р. Термостойкие углепластики для рабочего колеса центробежного компрессора // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2016. №2 (38). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.12.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-8-8.
9. Евдокимов А.А., Гуляев И.Н., Зеленина И.В. Исследование физико-механических свойств и микроструктуры объемно-армированного углепластика // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2019. №4 (76). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.12.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-38-47.
10. Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Раскутин А.Е., Панина Н.Н. Свойства угле- и стеклопластиков на основе плетеных преформ // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №4 (45). С. 54–59. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-54-59.
11. Шимкин А.А., Пономаренко С.А., Мухаметов Р.Р. Исследование процесса отверждения дифталонитрильного связующего // *Журнал прикладной химии*. 2016. Т. 89. №2. С. 256–264.
12. Гусева М.А. Циановые эфиры – перспективные терморезистивные связующие (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №2 (35). С. 45–50. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-45-50.
13. Валева Е.О., Зеленина И.В., Мараховский П.С., Гуляев А.И., Бухаров С.В. Исследование влияния тепловлажностного воздействия на фталонитрильную матрицу // *Материаловедение*. 2015. №9. С. 15–19.
14. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
15. Гращенко Д.В. Стратегия развития неметаллических материалов, металлических композиционных материалов и теплозащиты // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.