

УДК 678.8

А.В. Начаркина¹, И.В. Зеленина¹, М.И. Валуева¹, О.Г. Воронина¹

ВЛИЯНИЕ АППРЕТИРОВАНИЯ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ОБЪЕМНО-АРМИРОВАННЫХ ПРЕФОРМ НА СВОЙСТВА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО УГЛЕПЛАСТИКА

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-54-65

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния дополнительного аппрета на свойства высокотемпературного углепластика на основе термостойкого терморезактивного фталонитрильного связующего и объемно-армированной тканой преформы. Приведены сравнительные данные по физико-механическим свойствам углепластиков на основе преформ с аппретом и без аппрета, в том числе после воздействия эксплуатационных факторов (тепловое старение, водо- и влагопоглощение), результаты термического анализа и исследования микроструктуры.

Ключевые слова: углеродное волокно, объемно-армированные тканые преформы, аппрет, удаление аппрета, высокотемпературный углепластик, физико-механические свойства.

A.V. Nacharkina¹, I.V. Zelenina¹, M.I. Valueva¹, O.G. Voronina¹

INFLUENCE OF ADDITIONAL SIZING OF CARBON FIBER IN PRODUCING VOLUME-REINFORCED PREFORMS ON THE PROPERTIES OF HIGH-TEMPERATURE CARBON FIBER

Presents the results of experimental studies of the effect of additional apparet on the properties of high-temperature carbon plastic based on a heat-resistant thermosetting phthalonitrile binder and a volume-reinforced woven preform. Comparative data are given on physical and mechanical properties of carbon plastics based on preforms with and without an apparet, including after exposure to operational factors (thermal aging, water and moisture absorption), results of thermal analysis and microstructure research.

Keywords: carbon fiber, bulk-reinforced perform, sizing, removal of sizing, high-temperature carbon plastic, physic-mechanical properties.

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

В настоящее время происходит активное развитие и внедрение новых материалов во всех видах промышленности. Большое количество перспективных разработок и исследований проводится в области полимерных композиционных материалов (ПКМ), среди которых углепластики находят самое широкое применение [1–8]. В связи с этим при создании новых видов углепластиков к ним предъявляются все более высокие требования для возможности применения их в различных условиях эксплуатации.

В авиационной отрасли предъявляются особенно жесткие требования к весовым и удельным характеристикам сборочных узлов и воздушного судна в целом, в том числе и к массе силовых установок. Снижение массы таких установок может быть достигнуто при использовании композиционных материалов, а также с помощью новых конструктивных решений, позволяющих эффективно использовать уникальные свойства армированных материалов [9–13]. Для вертолетных двигателей третьего поколения

с целью повышения их весовой эффективности поставлена задача по замене рабочего колеса центробежного компрессора (РКЦК), выполненного из титанового сплава, на РКЦК из ПКМ. Для реализации этой задачи разработаны углепластики на рабочую температуру до 300 °С для кольцевых (углепластик марки ВКУ-38ЖН) и лопаточных (углепластик марки ВКУ-38ТР) элементов РКЦК [14]. Однако процесс изготовления лопаточных элементов из углеродной равнопрочной ткани длительный и трудоемкий, поэтому было предложено изготавливать лопаточный элемент на основе объемно-армированных тканых преформ из углеродного волокна [11, 12, 15].

Объемно-армированные тканые преформы (3D-структуры), в том числе и из углеродного волокна, находят все более широкое применение, как за рубежом, так и в России. Благодаря единой сложной объемной структуре и превосходным механическим характеристикам объемно-армированные тканые преформы активно применяются в авиационной промышленности, автомобилестроении, в строительной и других отраслях [16–19].

Объемно-армированные тканые 3D-структуры могут выполняться с использованием нескольких видов волокон в каждом из направлений (x , y , z), что приводит к получению ПКМ с заданными свойствами. Увеличение количества направлений армирования при использовании 3D-структур способствует повышению ударной вязкости ПКМ, уменьшает вероятность расслаивания, создает возможности проектирования ПКМ с заданными физико-механическими свойствами, обеспечивает повышенную прочность в трансверсальном (перпендикулярном слоям) направлении [20, 21].

Другими преимуществами изготовления ПКМ на основе объемных текстильных преформ являются сокращение времени изготовления сложнопрофильных деталей, снижение производственных расходов за счет механизации процесса и уменьшения доли ручного труда. Изделие с заданными геометрическими параметрами можно изготавливать за один технологический цикл формования, без применения дополнительных операций и приспособлений, как для выкладки многослойного материала [22, 23].

При разработке новых материалов всегда возникает ряд проблем и задач, нуждающихся в решении. Не является исключением и технология изготовления РКЦК на основе термостойкого термореактивного связующего и объемно-армированной тканой преформы.

Для улучшения технологических и физико-химических свойств на углеродные волокна, предназначенные для ткачества, наносится аппрет в количестве 1,0–1,5% (по массе). При изготовлении объемно-армированных тканых преформ для уменьшения расщепления и обрывности углеродных жгутов, а также повышения технологичности переработки, жгуты подвергают процедуре дополнительного аппретирования, в результате которой содержание аппрета увеличивается более чем в 2 раза (3,0–3,5% (по массе)). Для высокотемпературных углепластиков аппрет, наносимый для улучшения качества, имеет негативное действие, так как при температурах отверждения >250 °С начинается процесс деструкции аппрета, приводящий к порообразованию в полимерной матрице, что влияет на структуру и свойства углепластика [15].

В данной статье рассматриваются результаты исследований влияния аппрета на свойства высокотемпературных углепластиков на основе преформ различных структур.

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

Материалы и методы

Для изготовления углепластиков и проведения исследования использовали следующие материалы:

– термостойкое термореактивное фталонитрильное связующее марки ВСН-31 (ФГУП «ВИАМ»);

– углеродный наполнитель – объемно-армированные тканые полотна (преформы) ортогональной и сатиновой структуры армирования (АО «ТРИ-Д») из углеродного среднемодульного волокна (рис. 1).

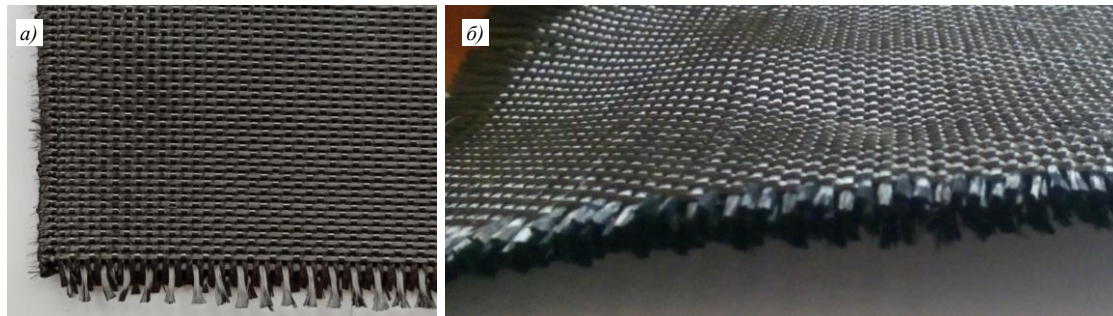


Рис. 1. Объемно-армированные тканые полотна из углеродного жгута ортогональной (а) и сатиновой структур (б)

Образцы углепластика для испытаний вырезали из однородных по толщине плит в направлениях главных осей ортотропии исследуемого материала. Определение механических характеристик образцов углепластиков проводили с применением стандартизованных методов на испытательных машинах Тиратест-2300, Тиратест-2200 и LFM-100:

- предел прочности при растяжении – по ГОСТ Р 56785–2015;
- предел прочности при сжатии – по ГОСТ Р 56812–2015;
- предел упругости при статическом изгибе – по ГОСТ Р 56810–2015;
- предел прочности при межслойном сдвиге – по ГОСТ Р 57745–2017;
- предел прочности при сдвиге в плоскости слоя – по ASTM D5379.

Определение плотности проводили по ГОСТ 15139–69.

Водопоглощение и влагопоглощение определяли по ГОСТ 12020–72.

Ускоренные климатические испытания проводили в соответствии с ГОСТ 9.707–81 при тепловлажностном воздействии в течение 1 и 2 мес по режиму: температура 60 °С, относительная влажность 85%.

Тепловое старение проводили в соответствии с СТП 1-595-101–83 при температуре 300 °С и экспозиции: 100, 200 и 300 ч.

Микрофотографии торцов образцов, вырезанных в направлении 0 и 90 градусов из углепластиков, получены с помощью оптического электронного микроскопа Olympus BX51 с увеличением до 100 раз.

Результаты и обсуждение

В научно-технической литературе можно найти данные о различных способах удаления аппрета. Наиболее широко используются как минимум два доступных и простых для осуществления метода удаления замасливателя или аппрета, а именно – отмывка от аппрета или замасливателя с помощью органических растворителей (ацетон, спирто-ацетоновая смесь и т. п.) и высокотемпературный отжиг в различных условиях. Эти методы достаточно широко используются, например, при подготовке углеродных волокон к нанесению интерфазных покрытий при изготовлении композиционных материалов с керамической матрицей [24–27] или при подготовке волокна к последующему аппретированию [28–31].

Методом термического анализа определен температурный интервал термического разложения аппрета, нанесенного на углеродное волокно при изготовлении объемно-армированных тканых полотен (преформ) (рис. 2). По данным термического анализа деструкция аппрета протекает в интервале температур от 304 до 366 °С, количество удаленного аппрета при этом составляет 3,2% (по массе).

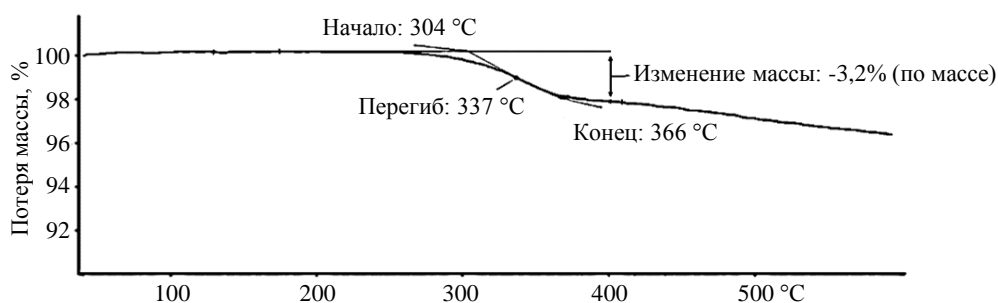


Рис. 2. Термогравиметрическая кривая углеродного жгута с аппретом из преформы

Для выбора способа удаления аппрета изготовлены и исследованы углепластики на основе фталонитрильного связующего и преформ сатинового переплетения – исходной (3,2% (по массе) аппрета) и с удаленным аппретом. Аппрет удаляли двумя способами:

- отмывкой спирто-ацетоновым раствором с последующей сушкой;
- термическим разложением (отжигом) в муфельной печи при температуре до 400 °С.

Результаты исследований свойств полученных углепластиков приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительные свойства углепластика на основе преформ сатинового переплетения

Свойства	Направление приложения нагрузки, градус	Значения свойств при состоянии преформы		
		исходной (с аппретом)	с удаленным аппретом	
			с помощью растворителя	отжигом при 400 °С
Содержание аппрета, % (по массе)	–	3,2	0,15–0,22	0,01–0,05
Содержание связующего, % (по массе)	–	32–35	33–36	34–36
Плотность, г/см ³	–	1,571±0,01	1,576±0,01	1,575±0,01
Пористость, %	–	2,16±0,2	1,52±0,2	1,26±0,2
Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа	0 (основа)	30	57	57
	90 (уток)	32	49	51
Прочность при статическом изгибе, МПа	0 (основа)	210	200	210
	90 (уток)	385	390	400

Независимо от метода удаления аппрета механические свойства углепластиков на основе преформ с удаленным аппретом имеют приблизительно одинаковый уровень значений. Следует отметить, что даже после многократной отмывки в преформе остается некоторое количество неудаленного аппрета, тогда как при термическом разложении удается удалить практически весь аппрет.

Затруднение при использовании способа отмывки с помощью растворителя для удаления аппрета связано со структурой преформ, имеющих достаточную толщину (3,31–3,32 мм) и высокую плотность структуры (общее количество нитей на 100 мм: 180–240 – по основе и 244–308 – по утку).

По результатам анализа полученных данных для удаления аппрета выбран метод термического разложения, поскольку он экологически более безопасный по сравнению с использованием органических растворителей. Кроме того, использование термического способа удаления аппрета не только не ухудшает упруго-прочностные свойства углеродного волокна [27], но и может приводить к активации его поверхности – о чем свидетельствует увеличение удельной поверхности с 1,36 (исходное волокно) до

4,72 м²/г (отожженое волокно) и сорбционной емкости с 0,32 (исходное волокно) до 1,12 см³/г (отожженое волокно) [32].

Ранее [15] исследованы свойства углепластиков на основе преформ ортогонального и сатинового типа плетения и установлено, что углепластик на основе преформы ортогональной структуры имеет более высокие физико-механические характеристики, чем углепластик на основе преформы сатинового плетения. Поэтому для дальнейшего применения при изготовлении РКЦК выбрана преформа ортогонального плетения и углепластик на ее основе [33]. Для проведения дальнейших исследований по оценке влияния аппрета на свойства материала изготовили углепластики на основе связующего ВСН-31 и преформ ортогональной структуры – исходной, содержащей 3,2% (по массе) аппрета, и без аппрета (удален методом термического разложения).

Для оценки качества полученных углепластиков на оптическом электронном микроскопе Olympus VX51 с увеличением до 100 раз получены микрофотографии торцов образцов, вырезанных в направлении 0 и 90 градусов (рис. 3).

На микрофотографиях углепластика на основе исходной преформы ортогональной структуры, содержащей 3,2% (по массе) аппрета (рис. 3, а, в), в пространстве около волокна обнаруживаются поры, которые образованы продуктами термического разложения аппрета в процессе отверждения углепластика при температурах 250–300 °С. При исследовании микроструктуры углепластика на основе преформы с удаленным аппретом (рис. 3, б, г), дефектов матрицы в виде пор, особенно в местах пересечения и контакта жгутов, не наблюдается. Отсутствие достаточно крупных пор, наблюдаемых в углепластике на преформе с аппретом, приводит к увеличению плотности и снижению пористости углепластика на основе преформы с удаленным аппретом.

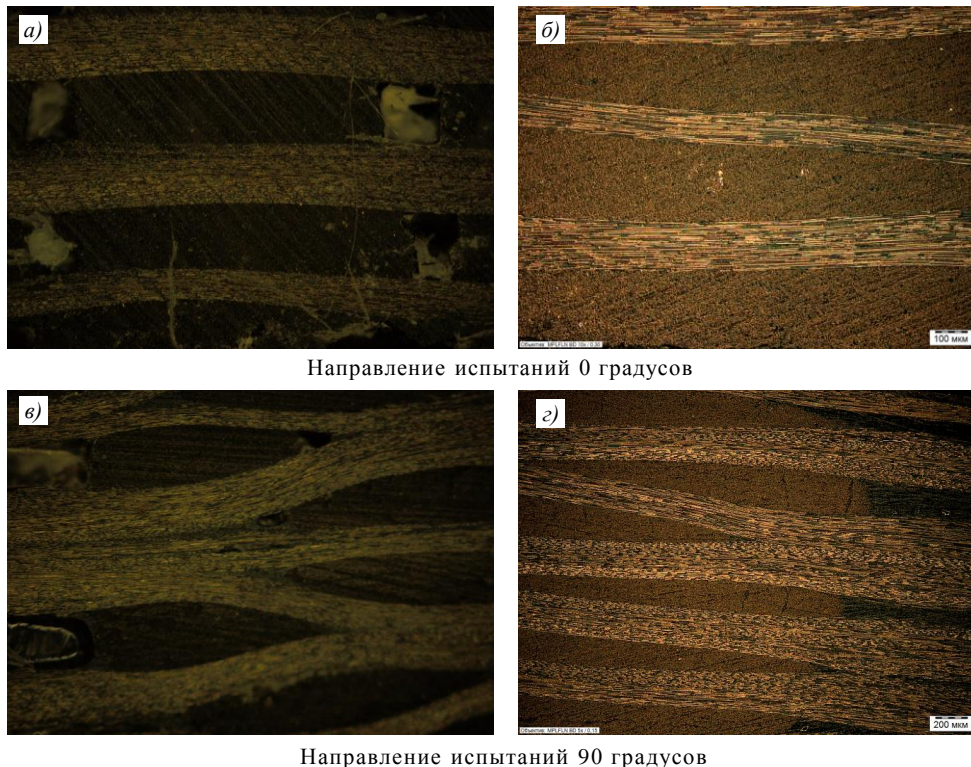


Рис. 3. Микрофотографии образцов углепластиков из преформы ортогональной структуры исходной (а, в) и с удаленным аппретом (б, г)

В табл. 2 представлены значения для сравнения физических свойств полученных углепластиков.

Таблица 2

Физические свойства углепластиков на основе преформ ортогональной структуры при температуре испытаний 20 °С

Свойства	Значения свойств при состоянии преформы	
	исходной (3,2% (по массе) аппрета)	с аппретом, удаленным отжигом при 400 °С
Содержание связующего, % (по массе)	32–36	34–36
Плотность, г/см ³	1,568±0,01	1,575±0,01
Пористость, %	2,32±0,2	1,48±0,2

Видно, что, несмотря на одинаковое содержание связующего 32–36% (по массе), плотность углепластика на основе преформы с удаленным аппретом больше, а пористость меньше, чем у углепластика на основе исходной преформы.

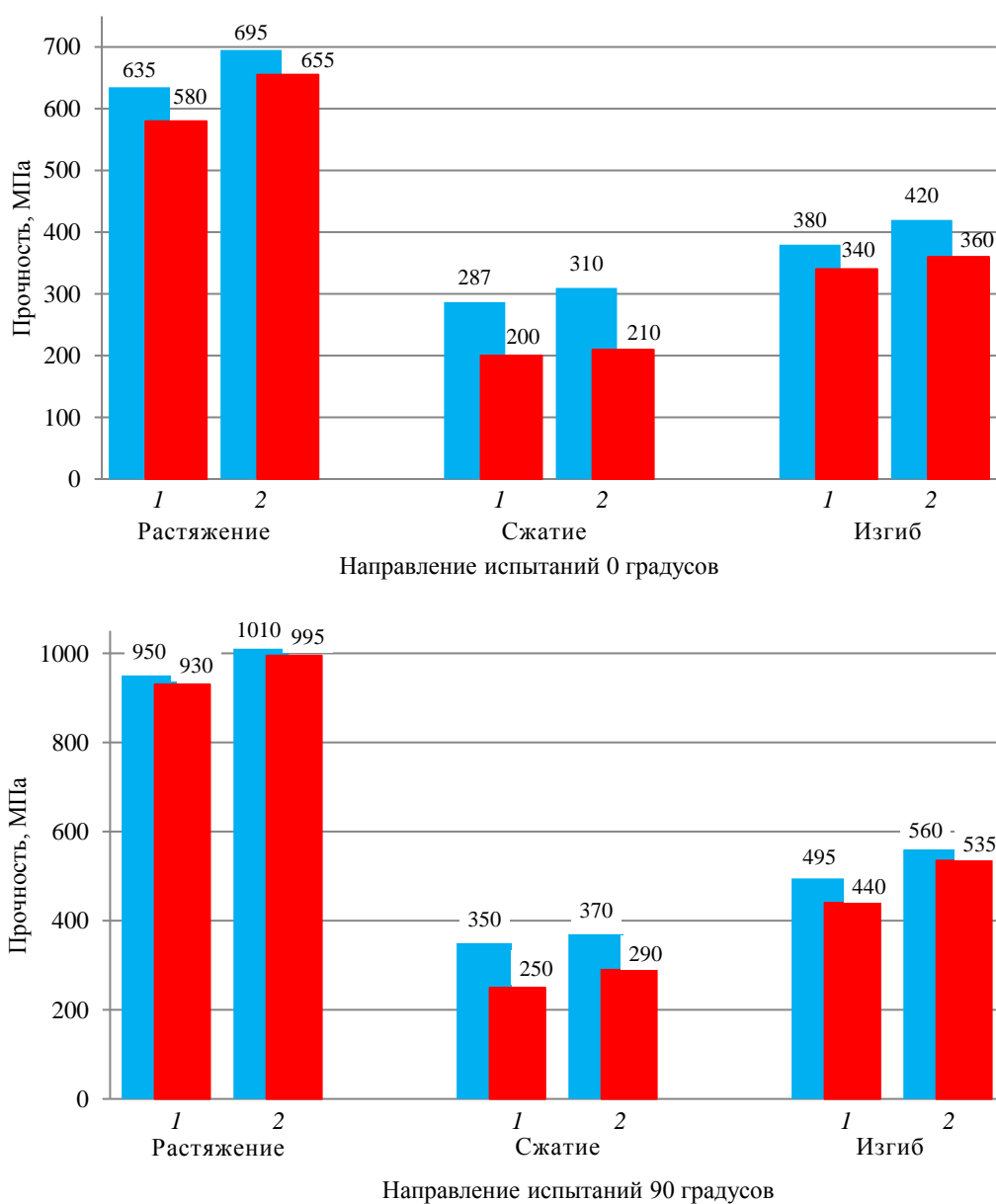


Рис. 4. Прочностные свойства углепластиков на основе исходной преформы (1) и с удаленным аппретом (2) при температуре испытаний 20 (■) и 300 °С (■)

На рис. 4 приведены характеристики прочности углепластиков на основе исходной преформы (3,2% (по массе) аппрета) и с удаленным аппретом при температурах испытаний 20 и 300 °С. Видно, что сохранение свойств от уровня исходных (при 20 °С) значений углепластиков на основе преформы с удаленным аппретом при температуре испытаний 300 °С несколько больше, чем у углепластика на основе преформы с аппретом. Сохранение уровня прочностных свойств, %:

Вид испытания	Углепластик на основе преформы	
	с аппретом	без аппрета
Растяжение	91–98	98
Статический изгиб	85–89	89–95
Сжатие	69–71	68–78

В табл. 3 приведены данные по сравнению прочностных свойств углепластиков на основе исходной преформы и с удаленным аппретом при температуре испытаний 20 °С.

Таблица 3

Сравнение механических свойств углепластиков при температуре испытаний 20 °С

Свойства	Направление приложения нагрузки, градус	Углепластик на основе преформы		Квота превосходства, %
		с аппретом	без аппрета	
Предел прочности при растяжении, МПа	0 (основа)	635	695	9,4
	90 (уток)	950	1010	6,3
Предел прочности при сжатии, МПа	0 (основа)	287	310	8,0
	90 (уток)	350	370	5,7
Предел прочности при изгибе, МПа	0 (основа)	380	420	10,5
	90 (уток)	495	560	13,1
Прочность при межслойном сдвиге, МПа	0 (основа)	50	61	22,0
	90 (уток)	54	68	25,9
Прочность при сдвиге в плоскости листа, МПа	0 (основа)	47	64	36,2
	90 (уток)	62	80	29,0

Видно, что прочностные свойства выше у углепластика на основе преформы с удаленным аппретом. Увеличение прочности характерно при испытаниях как по основе, так и по утку, причем квота превосходства при растяжении и сжатии не превышает 10%. Существенное увеличение прочности на 22–36% наблюдается при сдвиге в плоскости листа и межслойном сдвиге, т. е. характеристик, зависящих как от прочности адгезионной связи между углеродными волокнами и полимерной матрицей, так и от прочности и бездефектности самой матрицы [34, 35].

Исследованы также свойства углепластиков на основе преформ ортогональной структуры после воздействия эксплуатационных факторов, таких как тепловое и тепловлажностное старение. На рис. 5 приведены сравнительные данные прочности при статическом изгибе при температуре испытаний 20 и 300 °С после теплового старения при температуре 300 °С. Видно, что сохранение свойств углепластиков после 300 ч теплового старения при 300 °С при температуре испытаний 20 °С (по отношению к исходным значениям) составило: на основе исходной преформы с аппретом 48%, на основе преформ без аппрета 63%, а также при температуре испытаний 300 °С это сохранение прочности приблизительно одинаково и составляет 50 и 51% соответственно. Таким образом, несмотря на приблизительно одинаковый процент сохранения упругопрочностных свойств при температуре испытаний 300 °С (кратковременное воздействие), использование преформы с удаленным аппретом позволяет увеличивать длительную теплостойкость на 15%.

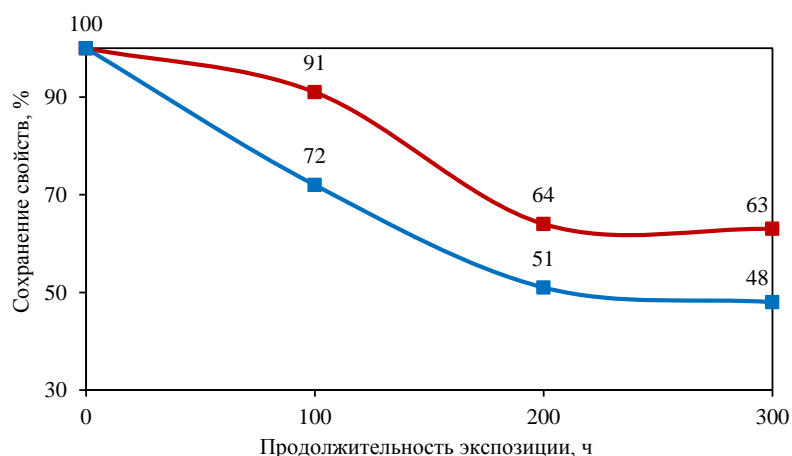


Рис. 5. Сохранение прочности после теплового старения при температуре 300 °С при испытании на статический изгиб при температуре 20 °С исходного углепластика (—) и с удаленным аппретом (—)

После 60 сут экспозиции в климатической камере при температуре 60 ± 2 °С и влажности $85\pm 3\%$ образцы углепластиков на основе преформ с аппретом и без него были испытаны при статическом изгибе (табл. 4). В процессе экспозиции определялось также влагопоглощение образцов по их привесу. На рис. 6 приведены кривые влагонасыщения углепластиков на основе преформ ортогональной структуры в исходном состоянии с аппретом и без него.

Таблица 4

**Прочность при статическом изгибе углепластиков
после экспозиции в климатической камере**

Углепластик на основе преформы	Температура испытания, °С	Прочность при статическом изгибе, МПа	
		в исходном состоянии	после экспозиции 60 сут
С аппретом	20	494	524
	300	437	460
Без аппрета	20	560	565
	300	495	515

В результате анализа кривых влагопоглощения, представленных на рис. 6, видно, что их характер приблизительно одинаков. Максимальное насыщение влагой наступает в течение первых двух недель и далее прослеживается незначительное увеличение содержания влаги до достижения равновесного влагонасыщения, причем влагопоглощение у углепластика на основе преформы с удаленным аппретом в 2,6 раза ниже (0,38%), чем у углепластика на основе исходной преформы (0,99%).

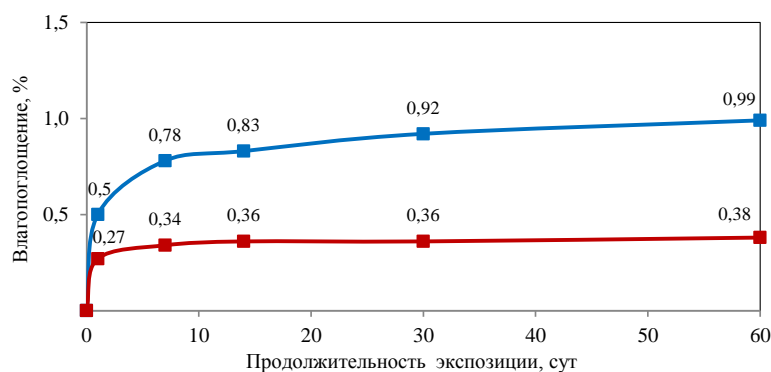


Рис. 6. Влагопоглощение углепластиков на основе преформ ортогональной структуры в исходном состоянии (—) и с удаленным аппретом (—)

Следует отметить, что углепластики на основе фталонитрильного связующего устойчивы к воздействию воды и влаги [36], поэтому, несмотря на различное количество поглощенной влаги, сохранение прочности при статическом изгибе у обоих углепластиков одинаковое и составляет 100% при температуре испытаний 20 °С, а также 88–90% при температуре испытаний 300 °С. Некоторое увеличение прочности после экспозиции в условиях климатической камеры объясняется пластифицирующим действием сорбированной влаги на жесткую матрицу связующего ВСН-31, приводящим к релаксации внутренних напряжений в углепластиках.

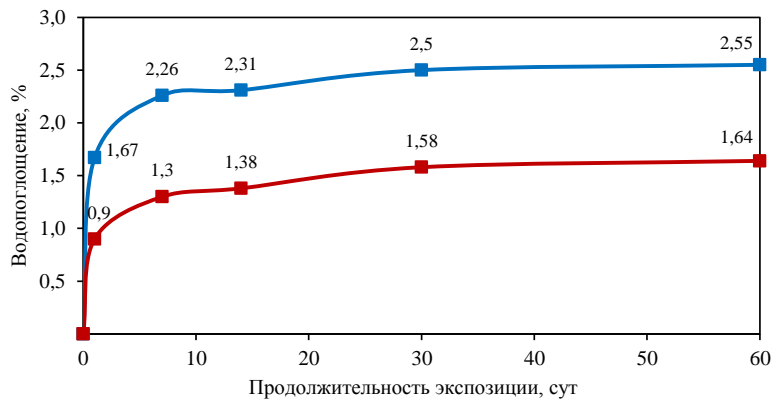


Рис. 7. Водопоглощение углепластиков на основе преформ ортогональной структуры в исходном состоянии (—) и с удаленным аппретом (—)

На рис. 7 представлены для сравнения кривые водопоглощения углепластиков на основе преформ в исходном состоянии и с удаленным аппретом. Видно, что, так же как и в случае влагопоглощения, наблюдается одинаковый характер кривых водопоглощения углепластиков. Максимальное насыщение водой происходит в течение 30 сут, и в дальнейшем наблюдается равномерный прирост до достижения равновесного водопоглощения, причем водопоглощение у углепластика на основе преформы с удаленным аппретом в 1,5 раза ниже (1,64%), чем у углепластика на основе исходной преформы (2,55%).

Заключения

Проведенные исследования показали положительное влияние удаления аппрета с преформ как сатиновой, так и ортогональной структур, на прочностные и эксплуатационные свойства углепластиков на основе высокотемпературного связующего ВСН-31. Удаление излишков аппрета с наполнителя позволяет получить углепластик с увеличенной плотностью и пониженной пористостью, что приводит к снижению водопоглощения в 1,5 раза и влагопоглощения в 2,6 раза.

В итоге проведенных испытаний физико-механических свойств обнаружено, что углепластик на основе преформ без аппрета имеет не только более высокий уровень характеристик по сравнению с углепластиком на основе преформы с аппретом, но и повышенный уровень сохранения этих свойств при температуре испытаний 300 °С. Наиболее существенное увеличение прочности наблюдается при испытаниях на сдвиг – на 22–36%. Углепластик на основе преформы без аппрета показал также сохранение прочности после теплового старения при 300 °С на 15% больше, чем углепластик на основе преформы с аппретом.

Для обеспечения максимальной прочности материалов из объемно-армированных тканых преформ, при их разработке следует учитывать влияние аппрета,

а именно – применяя при необходимости для его удаления либо метод отмычки аппарата растворителем, либо термический отжиг при температуре больше температуры деструкции аппарата.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам ФГУП «ВИАМ» – С.Л. Лонскому за предоставление оборудования и помощь в получении микрофотографий образцов углепластика, И.О. Самохваловой и А.М. Губину за выполнение исследований упруго-прочностных свойств углепластиков.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. №1. С. 36–39.
2. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. №7–8. С. 54–58.
3. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2018. №2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
4. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Иноземцев А.А. Влагонасыщение конструктивно-подобных элементов из полимерных композиционных материалов в открытых климатических условиях с наложением термоциклов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №2 (47). С. 56–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-56-68.
5. Бойчук А.С., Генералов А.С., Диков И.А. Контроль деталей и конструкций из полимерных композиционных материалов с применением технологии ультразвуковых фазированных решеток // Авиационные материалы и технологии. 2017. №1 (46). С. 45–50. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-45-50.
6. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Луценко А.Н. Математическое моделирование деформирования конструкционного углепластика при изгибе // Авиационные материалы и технологии. 2016. №2 (41). С. 50–59. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-50-59.
7. Антюфеева Н.В., Алексахин В.М., Павлов М.Р., Столянков Ю.В. Исследование возможности использования углепластиков в условиях арктического климата // Авиационные материалы и технологии. 2016. №4 (45). С. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-86-94.
8. 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.
9. Каблов Е.Н., Скибин В.А., Абузин Ю.А., Кочетов В.Н., Шавнев А.А., Каримбаев Т.Д., Луппов А.А. Широкохордные лопатки вентиляторов для ТРДД 5–6 поколений // Конверсия в машиностроении. 2006. №5. С. 5–16.
10. Каримбаев Т.Д., Луппов А.А., Афанасьев Д.В. Рабочие лопатки вентиляторов для перспективных двигателей // Двигатель. 2011. №6. С. 2–10.
11. Мекхэм М. Snecma и ее партнер АЕС создают новую технологию изготовления композитных лопаток // Авиатранспортное обозрение. 2012. №131. URL: <http://www.ato.ru/content/snecma-i-ee-partner-aec-sozdayut-novuyu-tehnologiyu-izgotovleniya-kompozitnyh-lopatok> (дата обращения: 06.11.2020).
12. Новиков А.С., Каримбаев Т.Д., Луппов А.А. и др. Инновации при применении композиционных материалов в авиационных двигателях // Двигатель. 2015. №2 (98). С. 6–9.
13. Новиков А.С., Каримбаев Т.Д. Рабочие лопатки вентиляторов большой степени двухконтурности для перспективных ТРДД // Двигатель. 2015. №5 (101). С. 6–11.
14. 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: 06.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-8-8.

15. 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: 06.11.2020). DOI: 0.18577/2307-6046-2019-0-4-38-47.
16. 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 // Авиационные материалы и технологии. 2019. №4 (57). С. 18–26. 10.18577/2071-9140-2019-0-4-18-26.
17. Тканые преформы, имеющие заданную форму, с разнонаправленным армированием для композиционных структур: пат. 2504478 Рос. Федерация. №2010134758/05; заявл. 09.02.09; опубл. 20.01.14.
18. Soutis C. Fibre reinforced composites in aircraft construction // Progress in Aerospace Sciences. 2005. No. 41 (2). P. 143–151.
19. Hufenbach W., Böhm R., Thieme M. et al. Polypropylene/glass fibre 3D-textile reinforced composites for automotive applications // Materials and Design. 2011. No. 32 (3). P. 1468–1476.
20. Богомолов П.И., Козлов И.А., Бируля М.А. Обзор современных технологий изготовления объемно-армирующих преформ для перспективных композиционных материалов // Технико-технологические проблемы сервиса. 2017. №1. С. 22–27.
21. Behera V.K., Mishra R. 3-Dimensional weaving // Indian Journal of Fibre and Textile Research. 2008. No. 33 (3). P. 274–287.
22. Сергеев В.Т. Разработка структуры и технологии изготовления многослойной комбинированной ткани из углеродных и кварцевых нитей: автореферат дис. ... канд. техн. наук. М.: Моск. гос. ун-т дизайна и технологии, 2014. 16 с.
23. Донецкий К.И., Хрульков А.В., Коган Д.И., Белинис П.Г., Лукьяненко Ю.В. Применение объемно-армирующих преформ при изготовлении изделий из ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2013. №1 (26). С. 35–39.
24. Бакланова Н.И. Интерфейсные покрытия на армирующих углеродных и карбидокремниевых волокнах для композитов с керамической матрицей: дис. ... д-ра хим. наук. Новосибирск: Ин-т химии твердого тела и механохимии СО РАН, 2010. 380 с.
25. Бакланова Н.И., Зима Т.М., Титов А.Т., Исаева Н.В., Гращенков Д.В., Солнцев С.С. Защитные покрытия для углеродных волокон // Неорганические материалы. 2006. Т. 42. №7. С. 823–829.
26. Урванов С.А. Модифицирование углеродного волокна углеродными наноструктурами: дис. ... канд. хим. наук. М.: ТИСНУМ, 2016. 155 с.
27. Валуева М.И., Зеленина И.В., Хасков М.А., Гуляев А.И. Подготовка углеродного волокна к нанесению интерфазного покрытия для композиционных материалов с керамической матрицей // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2017. №10 (58). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-9-9.
28. Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я. Разработка и исследование аппретирующих составов для термопластичных углепластиков // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2016. №12 (46). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-12-9-9.
29. Беев А.А., Хаширова С.Ю., Слонов А.Л. и др. Активация поверхности углеродных и стеклянных волокон // Новые полимерные композиционные материалы: сб. науч. тр. XV Междунар. науч.-практ. конф. (г. Нальчик, 3–7 июля 2019 г.). Нальчик, 2019. С. 71–75.
30. Способ получения аппретированных углеродных волокон и композиционные материалы на их основе: пат. 2712612 Рос. Федерация. №2019115024; заявл. 16.05.19; опубл. 29.01.20.
31. Кондрашова И.А., Чеблакова Е.Г., Евтеева Е.Е. Обработка углеродного волокна для дальнейшей эксплуатации в технологических процессах // Евразийский союз ученых. 2015. №3 (12). С. 36–38.
32. Хасков М.А., Зеленина И.В., Сорокин О.Ю., Гуляев А.И. Керамическое интерфазное покрытие на углеродных волокнах на основе поликарбосилана и олиговинилсилазана // Физика и химия стекла. 2019. Т. 44. №2. С. 1–9.

33. Евдокимов А.А., Гуляев И.Н., Начаркина А.В. Исследование физико-механических свойств объемно-армированного углепластика // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2020. №3 (87). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-66-73.
34. Перепелкин К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. СПб.: Научные основы и технологии, 2009. 380 с.
35. Рашкован И.А. Влияние модификации поверхности на свойства углеродных волокон и реализацию их прочности в однонаправленных полимерных композитах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Мытищи: Всероссийский научно-исследовательский институт полимерных волокон, 1993. 14 с.
36. Гуляев И.Н., Зеленина И.В., Валева Е.О., Шведкова А.К. Исследование влияния повышенной температуры и влажности на свойства термостойких углепластиков // Конструкции из композиционных материалов. 2015. №3. С. 55–60.