

УДК 678.83

Г.С. Кулагина¹, А.В. Коробова¹, А.В. Ильичев¹, Г.Ф. Железина¹**ФИЗИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
АНТИФРИКЦИОННОГО ОРГАНОПЛАСТИКА
НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННОГО ТКАНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ
И ЭПОКСИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-8-8

В работе исследовали антифрикционный органопластик на основе эпоксидного связующего и комбинированного тканого наполнителя, включающего политетрафторэтиленовые и полиимидные волокна. Получены данные о его основных физических свойствах и физико-механических свойствах при одноосном растяжении. Проанализированы кривые «напряжение–деформация», установлены температурные зависимости модуля упругости, прочности и относительного удлинения при растяжении. Антифрикционный органопластик представляет собой полимерный композиционный материал толщиной 0,25–0,30 мм и плотностью 1,55 г/см³, стойкий к действию воды и авиационным нефтепродуктам. Показано, что в исследуемом интервале температур от -40 до +60°C органопластик характеризуется прочностью 30–110 МПа, модулем упругости 0,7–4,5 ГПа и деформацией 3–22%. По результатам проведенных исследований антифрикционные органопластики могут быть с успехом использованы в качестве покрытия заданного размера и формы для модификации поверхностей трения без значимого увеличения массы и изменения конструктивных особенностей изделия в условиях умеренного климата, а также в средах, обогащенных парами нефтепродуктов.

Ключевые слова: антифрикционный органопластик, политетрафторэтиленовые волокна, полиимидные волокна, эпоксидное связующее, комбинированный тканый наполнитель, физико-механические свойства, кривые «напряжение–деформация», модуль упругости, прочность при растяжении, относительное удлинение.

An antifriction organoplastic based on epoxy binder and combined fabric filler including polytetrafluoroethylene and polyimide fibers was investigated. Data on its basic physical properties, physico-mechanical properties under uniaxial tension were obtained. The stress-strain curves were analyzed, the temperature dependences of the modulus of elasticity, strength and elongation at tension were established. Antifrictional organoplastic was a polymer composite material with 0,25–0,30 mm thickness and 1,55 g/cm³ density, has resistance to water and aviation petroleum products. It was shown that in the investigated temperature range from -40 to +60°C the organoplastic was characterized by strength of 30–110 MPa, elastic modulus of 0,7–4,5 GPa and deformations of 3–22%. According to the results of the research, antifriction organoplastics can be successfully used as a coating of a given size and shape for the modification of friction surfaces without significant weight gain and changes in the structural features of the product in conditions of moderate climate, as well as in environments enriched with vapors.

Keywords: antifriction organoplastic, polytetrafluoroethylene fibers, polyimide fibers, epoxy binder, combined woven filler, physical and mechanical properties, strain-strain curves, modulus of elasticity, tensile strength, elongation.

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

Одним из направлений научной деятельности ФГУП «ВИАМ» является разработка антифрикционных органопластиков для тяжело нагруженных узлов трения скольжения [1–8]. Антифрикционные органопластики марок Оргалон АФ-1М-260 и Оргалон АФ-1М-500 на основе политетрафторэтиленовых волокон широко используются в авиационной технике и позволяют решить важную проблему – обеспечить работоспособность подшипников без смазки, т. е. в условиях сухого трения. Их применение для формирования самосмазывающихся поверхностей трения позволяет значительно упростить конструкцию подшипников и снизить затраты на их обслуживание при эксплуатации. Тяжелонагруженные узлы трения с использованием антифрикционных органопластиков Оргалон АФ-1М-260 и Оргалон АФ-1М-500 имеются в конструкциях вертолетов Ка-32, Ка-50, Ка-52, Ми-28, Ми-34 и др. Это шарниры агрегатов несущей системы, системы управления, стоек шасси, крепления демпфера лопастей и др.

В работах [5–7] рассмотрены антифрикционные органопластики на основе комбинированных тканей из полиимидных и политетрафторэтиленовых волокон, арамидных волокон и волокон из сверхвысокомолекулярного полиэтилена. В качестве полимерной матрицы использовали растворное фенолокаучуковое или расплавное эпоксидное связующее. Исследованы антифрикционные свойства разработанных материалов и выявлены закономерности изменения этих свойств в зависимости от состава органопластика и нагрузочно-скоростных параметров в парах трения «органопластик–углепластик» и «органопластик–сталь». Показано, что данные материалы относятся к высокоэффективным материалам антифрикционного назначения для использования в качестве покрытий трения в тяжело нагруженных узлах (металл, углепластик), работающих без смазки в течение всего срока эксплуатации.

В данной работе в продолжение исследования свойств антифрикционных материалов рассмотрен органопластик на основе комбинированной ткани из полиимидных и политетрафторэтиленовых (ПТФЭ) волокон и расплавного эпоксидного связующего. Целью работы являлось исследование его основных физических и физико-механических свойств в диапазоне температур эксплуатации в умеренном климате.

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») [9].

Материалы и методы

Объектом исследования является антифрикционный органопластик, армированный полимерным наполнителем (ткань техническая арт. 5392-81, ТУ8278-124-35227510–2005), представляющим собой комбинированную двухстороннюю ткань, выпускаемую в суровом виде с двухуточным переплетением на базе неправильного четырехремизного атласа из политетрафторэтиленовых нитей марки «Полифен» с линейной плотностью 44,4 текс и полиимидных нитей марки «Аримид» с линейной плотностью 29,4 текс. Поверхностная плотность тканого наполнителя составляет 350 г/м². В качестве полимерной матрицы использовали расплавное эпоксидное связующее марки ВСЭ-40 (ТУ1-595-12-1502–2015). Время гелеобразования связующего при 110±2°С составляет 60 мин, температура стеклования отвержденного связующего 120°С.

Исследуемый органопластик получали в две стадии: на первой стадии осуществляли изготовление препрега органопластика на основе тканого комбинированного наполнителя (ткань техническая арт. 5392-81) и эпоксидного связующего ВСЭ-40; на второй – формование органопластика. Препрег получали по расплавной технологии на установке Соатема LS-11 при температуре 70°С [10, 11]. Органопластик изготавливали

методом вакуумного формования при температуре $130\pm 5^\circ\text{C}$. Массовая доля отвержденного связующего в органопластике составила $35\pm 5\%$ (по массе).

Плотность органопластика определяли методом гидростатического взвешивания при температуре 20°C по ГОСТ 15139–69. Сорбцию в парах воды органопластика проводили в условиях относительной влажности 50% и комнатной температуре эксикаторным методом, необходимая постоянная влажность достигалась с помощью растворов серной кислоты (плотность раствора $1,335\text{ г/см}^3$ [12]). Набухание в воде осуществляли при комнатной температуре в соответствии с ГОСТ 4650–2014 в течение 3 мес. Изменение массы образцов органопластика фиксировали гравиметрически с точностью $\pm 10^{-3}$ г. Сорбцию органопластика в парах нефтепродуктов осуществляли согласно СТП 1.595-20-355–2001 при комнатной температуре в течение 3 мес до установления сорбционного равновесия. В качестве среды использовали авиационное топливо ТС-1 (ГОСТ 10227) и авиационное масло ИПМ-10 (ТУ 38.101299).

Физико-механические испытания тканого наполнителя и органопластика проводили на разрывной машине Zwick Z 005 при растяжении со скоростью 10 мм/мин при температурах от -40 до $+60^\circ\text{C}$ и атмосферном давлении. Образцы ткани для испытаний представляли собой полоски размером 5×20 см согласно ТУ 8278-124-35227510–2005. Образцы органопластика имели размер 2×25 см согласно ГОСТ 25.601–80. Направленные приложения нагрузки: вдоль нитей основы и по утку тканого наполнителя.

Результаты

Физические свойства органопластика. В данной работе установлены основные физические свойства органопластика. Определены следующие характеристики: плотность материала, толщина, сорбционная емкость по отношению к парам воды и некоторым нефтепродуктам, степень набухания в воде. В табл. 1 представлены свойства исследуемого органопластика.

Таблица 1

Физические свойства антифрикционного органопластика

Толщина антифрикционного органопластика, мм	0,25–0,30
Плотность, г/см^3	1,55
Равновесная сорбционная емкость в парах воды (50%-ная влажность), % (по массе)	0,66
Равновесная степень набухания в воде, % (по массе)	1,58
Равновесная сорбционная емкость в парах нефтепродуктов, % (по массе):	
ТС-1	1,02
ИПМ-10	0,23

Вследствие того, что в состав материала включены только полимерные компоненты, его плотность имеет значение $1,55\text{ г/см}^3$. Толщина антифрикционного органопластика составляет 0,25–0,30 мм. Невысокая плотность и малая толщина органопластика позволяют использовать его в качестве покрытия заданного размера и формы для модификации поверхностей трения без значимого увеличения массы и изменения конструктивных особенностей изделия.

Сорбционные свойства органопластика представлены в табл. 1. Равновесная степень набухания органопластика в воде не превышает 1,6% (по массе). Изменение массы образцов органопластика при сорбции в парах воды (влажность) и нефтепродуктов – не более 1,1% (по массе). Линейные размеры образцов во всех испытаниях не изменяются. Таким образом, исследуемый органопластик обладает стойкостью по отношению к воде и авиационным нефтепродуктам и может успешно эксплуатироваться в их присутствии.

Физико-механические свойства органопластика. Полимерный наполнитель, используемый для формирования органопластика, как показано ранее, представляет собой комбинированную ткань, сочетающую два типа полимерных волокон: политетрафторэтиленовые и полиимидные нити. Ткань является двухсторонней, с преобладанием на каждой из сторон одного из вида волокон (в работе [8] приведены микрофотографии поверхностей ткани). В табл. 2 представлены некоторые свойства нитей, используемых при изготовлении тканого наполнителя.

Таблица 2

Свойства	Значения свойств для нитей	
	политетрафторэтиленовых марки «Полифен» [13, 14]	полиимидных марки «Аримид» [15]
Фазовое состояние	Кристаллический полимер со степенью кристалличности ~90%	Кристаллический полимер
Температура плавления $T_{пл}$, °C	327	550
Плотность, г/см ³	2,15–2,24	1,43–1,45
Линейная плотность нитей, текс	11–150	11–100
Относительная прочность при разрыве, сН/текс	10–18	50–80
Удлинение при разрыве, %	20–40	6–10
Равновесное влагосодержание, %	≤0,02	1–1,5
Максимальная температура эксплуатации, °C	260	350

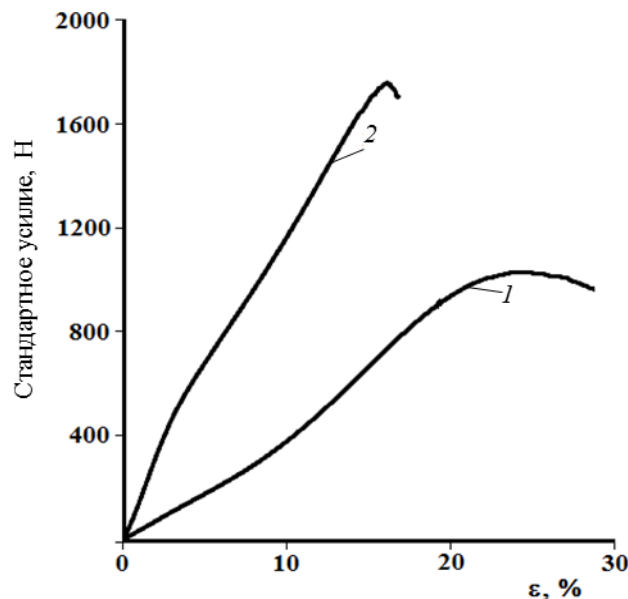


Рис. 1. Деформационные кривые при растяжении комбинированной антифрикционной ткани арт. 5392-81 приложении нагрузки по основе (1) и утку (2)

На рис. 1 показаны характерные деформационные кривые при растяжении комбинированной ткани из политетрафторэтиленовых и полиимидных волокон в направлении нитей основы ткани и в направлении утка. Видно, что они имеют вид S-образных кривых с участками упругой и пластической деформаций. При этом модуль упругости и разрывная нагрузка в 1,5–2 раза ниже, а относительное удлинение, наоборот, в 1,5 раза выше при растяжении вдоль основы по сравнению с растяжением в направлении утка. Это обусловлено структурой плетения ткани, в которой по основе расположены

низкопрочные политетрафторэтиленовые нити, а по утку распределены два вида нитей – политетрафторэтиленовые и полиимидные. Последние, как видно из данных табл. 2, превосходят фторопластовые нити по прочности и имеют более низкие деформационные свойства, за счет чего выполняют армирующую функцию. Общее количество нитей на единицу длины по основе в 1,5 раза меньше, чем по утку, в направлении которого распределено равное количество нитей двух видов. Так, на 1 см ткани по основе приходится 22 шт. политетрафторэтиленовых нитей, а по утку – по 17 шт. политетрафторэтиленовых и полиимидных нитей.

В табл. 3 представлены сравнительные деформационно-прочностные свойства антифрикционной ткани при растяжении вдоль нитей основы и утка.

Таблица 3

**Физико-механические свойства комбинированной антифрикционной ткани
арт. 5392-81 при температуре 20°C**

Направление приложения нагрузки	Модуль упругости, ГПа	Разрывная нагрузка, Н	Относительное удлинение при разрыве, %
Вдоль нитей основы ткани	0,38	1067	24
Вдоль утка ткани	0,84	1806	16

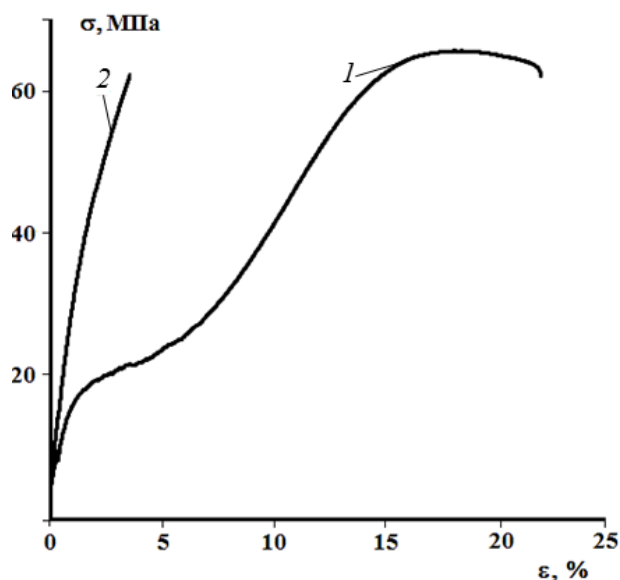


Рис. 2. Кривые «напряжение–деформация» при растяжении антифрикционного органопластика при приложении нагрузки по основе (1) и утку тканого наполнителя (2)

Свойства антифрикционного органопластика на основе политетрафторэтилен-полиимидной ткани и эпоксидного связующего определяются вкладом всех компонентов композиционного материала, структурой армирующего наполнителя, а также уровнем межфазного взаимодействия «матрица–наполнитель» [16–18]. Как видно из данных рис. 2, присутствие отвержденного связующего оказывает влияние на механизм деформации. Так, при растяжении органопластика вдоль основы тканого наполнителя кривая характеризуется явно выраженной S-образностью с участками упругой и пластической деформаций. Наблюдается сходство с механизмом деформации исходной ткани при растяжении в направлении основы, однако с более выраженным скачкообразным переходом в область пластических деформаций, тогда как при растяжении по утку зависимость $\sigma(\epsilon)$ характеризуется только упругой деформацией, соответствующей квазихрупкому механизму разрушения материалов. Очевидно, что эпоксидная матрица способствовала упрочнению материала и особенно влияла на свойства на первой

стадии процесса – в области упругих деформаций, тогда как ПТФЭ-составляющая в большей степени проявляется в области пластических деформаций и дает высокие значения относительного удлинения. Как видно из данных табл. 4, модуль упругости для органопластика по сравнению с тканым наполнителем больше в ~3 раза при растяжении в направлении утка и в ~5 раз при растяжении вдоль нитей основы. Относительное удлинение при разрыве органопластика в направлении приложения нагрузки по основе тканого наполнителя остается на том же уровне, что и для исходной ткани, т. е. приблизительно 20–25%. В то же время при растяжении вдоль утка относительное удлинение для органопластика составляет в среднем 3,5%, что в 4–5 раз ниже по сравнению с исходной тканью. Разрывная прочность при растяжении в различных направлениях (вдоль нитей основы и утка тканого наполнителя) имеет сопоставимые значения в отличие от исходного наполнителя, для которого прочность по утку в 1,5 раза выше, чем по основе.

Таблица 4

Физико-механические свойства антифрикционного органопластика при температуре 20°C

Направление приложения нагрузки	Модуль упругости, ГПа	Прочность при разрыве, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %
Вдоль нитей основы тканого наполнителя	1,9	65	20,2
Вдоль утка тканого наполнителя	2,7	63	3,5

В работе исследовано влияние температуры на деформационно-прочностные свойства органопластика на основе комбинированной политетрафторэтилен-полиимидной ткани в диапазоне температур эксплуатации, соответствующих умеренному климату – от -40 до +60°C. Установлены температурные зависимости модуля упругости, прочности и относительного удлинения при одноосном растяжении в направлении приложения нагрузки вдоль основы и утка тканого наполнителя (рис. 3–5).

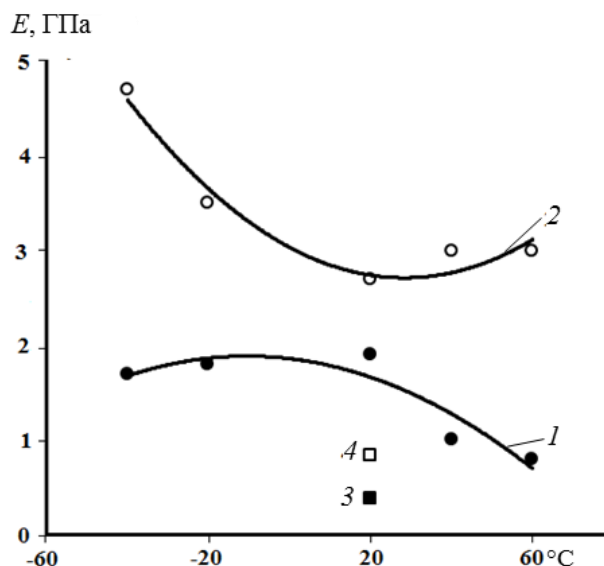


Рис. 3. Температурные зависимости модуля упругости при растяжении антифрикционного органопластика (кривые 1 и 2) и тканого наполнителя (точки 3 и 4) при приложении нагрузки по основе (1, 3) и утку тканого наполнителя (2, 4)

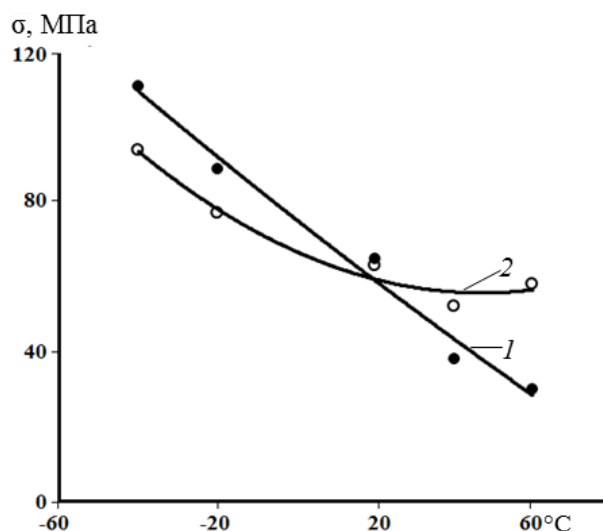


Рис. 4. Температурные зависимости прочности при растяжении антифрикционного органо-пластика при приложении нагрузки по основе (1) и утку тканого наполнителя (2)

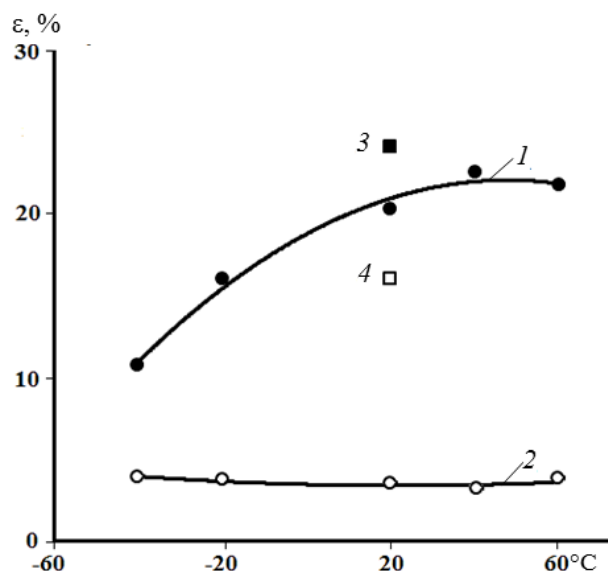


Рис. 5. Температурные зависимости относительного удлинения при растяжении антифрикционного органо-пластика (кривые 1 и 2) и тканого наполнителя (точки 3 и 4) при приложении нагрузки по основе (1, 3) и утку тканого наполнителя (2, 4)

Из данных рис. 3 можно видеть, что при растяжении вдоль утка тканого наполнителя модуль упругости (E) органо-пластика снижается с ростом температуры от -40 до $+20^\circ\text{C}$ на $\sim 40\%$ и в диапазоне от 20 до 60°C – остается на том же уровне. При растяжении вдоль основы ткани с увеличением температуры от -40 до $+20^\circ\text{C}$ значение E мало изменяется и начинает заметно снижаться при дальнейшем возрастании температуры до 60°C (на $\sim 60\%$). Очевидно, что такой вид зависимостей $E(T)$ обусловлен структурой наполнителя и присутствием эпоксидной полимерной матрицы. Отличие в тенденции изменения модуля упругости при растяжении в различных направлениях приложения нагрузки определяется ролью структуры тканого наполнителя. Следует отметить, что наибольшее сближение между значениями E , полученными при растяжении в направлении утка и основы тканого наполнителя, наблюдается при $\sim 20^\circ\text{C}$.

Как видно из данных рис. 4, прочность при растяжении (σ) антифрикционного органопластика снижается с ростом температуры. В случае приложения нагрузки вдоль нитей основы тканого наполнителя в исследуемом диапазоне температур можно отметить линейную зависимость $\sigma(T)$. При растяжении органопластика вдоль утка тканого наполнителя с возрастанием температуры от -40 до $+20^\circ\text{C}$ наблюдается значимое снижение прочности, тогда как при дальнейшем увеличении температуры от 20 до 60°C прочность, как и модуль упругости, практически не изменяется. Интересно, что значения σ при разрыве в направлении утка и основы при 20°C равны, в области температур от -40 до $+20^\circ\text{C}$ отличаются несущественно (причем при растяжении по утку значения ниже) и только при возрастании температуры $>20^\circ\text{C}$ можно видеть увеличение разницы в значениях прочности при различных направлениях приложения нагрузки.

Температурные зависимости относительного удлинения при растяжении ε для исследуемого органопластика представлены на рис. 5. Видно, что в рассматриваемом диапазоне температур при растяжении по направлению утка тканого наполнителя значение ε остается постоянным и составляет $3\text{--}4\%$, тогда как при растяжении по основе ткани с увеличением температуры относительное удлинение возрастает в ~ 2 раза (с ~ 10 до $\sim 20\%$). Интересно, что в интервале температур от -40 до $+20^\circ\text{C}$ наблюдается интенсивное возрастание ε , тогда как при температурах $20\text{--}60^\circ\text{C}$ значение ε практически не изменяется.

Таким образом, температурные зависимости деформационно-прочностных характеристик исследуемого органопластика подчиняются сложному механизму, обусловленному составом и структурой композиционного полимерного материала и зависят от направления приложения нагрузки. Результаты исследования показали роль отвержденного связующего, влияющего на структуру и свойства органопластика.

Следует отметить несколько аспектов, выявленных при анализе температурных зависимостей деформационно-прочностных свойств антифрикционного органопластика. Во-первых, показано влияние структуры армирующего наполнителя на физико-механические характеристики органопластика. Так, при растяжении органопластика по утку тканого наполнителя основное влияние на деформационно-прочностные характеристики оказывают полиимидные нити в составе тканого наполнителя, для которых характерно малое влияние температуры на прочность в исследуемом температурном интервале. При растяжении органопластика вдоль основы тканого наполнителя определяющую роль играют ПТФЭ волокна. Известно, что для ПТФЭ имеет место снижение прочности с ростом температуры [19] в рассматриваемом диапазоне и интенсивное увеличение деформации при температурах до $20\text{--}30^\circ\text{C}$ с последующими незначительными изменениями.

Во-вторых, следует отметить область температур $\sim 20^\circ\text{C}$, в которой наблюдается некий переход, выраженный в изменении тенденции на температурных зависимостях деформационно-прочностных параметров, вероятно обусловленный сменой механизма деформации. Можно предположить, что в исследуемом диапазоне температур до $\sim 20^\circ\text{C}$ решающее влияние на процесс деформации оказывает эпоксидная матрица и взаимодействие на границе раздела фаз «матрица–наполнитель». По мере приближения к температуре стеклования отвержденного эпоксидного связующего подвижность участков макромолекул возрастает, что сказывается на деформационно-прочностных свойствах композиционного материала. По этой причине с ростом температуры, как правило, наблюдается значительное снижение прочности и модуля упругости, а также увеличение деформации. Исключения составляют зависимости модуля упругости при растяжении по основе тканого наполнителя и деформации при растяжении по утку тканого наполнителя, которые в этом диапазоне мало изменяются в зависимости от температуры. В данном случае происходит выравнивание свойств – за счет влияния как

матрицы, так и структуры наполнителя. После $\sim 20^{\circ}\text{C}$ в большей степени, по мнению авторов, играет роль армирующий наполнитель. Прочность, модуль упругости и деформация при растяжении по утку тканого наполнителя в зависимости от температуры изменяются незначительно вследствие роли полиимидной составляющей ткани. При растяжении вдоль основы, наоборот, можно заметить интенсивное снижение прочности и модуля упругости. Деформационные свойства в этой области температур меняются мало – как было сказано ранее, для ПТФЭ характерно незначительное влияние температур выше $20\text{--}30^{\circ}\text{C}$ на деформацию [19].

Обсуждение и заключения

Таким образом, в данной работе получены данные по основным физическим и физико-механическим свойствам антифрикционного органопластика на основе комбинированного политетрафторэтиленполиимидного тканого наполнителя и эпоксидного связующего. Определены такие параметры, как плотность, толщина покрытия, равновесное влагосодержание, степень набухания в воде и нефтепродуктах. Установлены деформационно-прочностные характеристики тканого наполнителя и органопластика на его основе при растяжении в направлении приложения нагрузки по основе нитей и по утку тканого наполнителя. Проведен сравнительный анализ. Проанализированы кривые «напряжение–деформация» для исходного тканого наполнителя и органопластика на его основе. Установлены температурные зависимости модуля упругости, прочности и деформации при растяжении. Показано, что исследуемый полимерный композиционный материал в диапазоне температур от -40 до $+60^{\circ}\text{C}$ характеризуется достаточно высокими прочностными свойствами (модуль упругости $0,7\text{--}4,5$ ГПа, прочность при растяжении $30\text{--}110$ МПа) и небольшими относительными деформациями (удлинение при растяжении $3\text{--}22\%$), следовательно может с успехом эксплуатироваться в условиях умеренного климата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002. М.: МИСИС–ВИАМ, 2002. С. 23–47.
2. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. матер. 3-е изд. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
3. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. №1. С. 36–39.
4. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. №5. С. 7–27.
5. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
6. Бейдер Э.Я., Донской А.А., Железина Г.Ф., Кондрашов Э.К. и др. Опыт применения фторполимерных материалов в авиационной технике // Российский химический журнал. 2008. Т. LI. №3. С. 30–44.
7. Железина Г.Ф. Конструкционные и функциональные органопластики нового поколения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №4. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.07.2017).
8. Кулагина Г.С., Коробова А.В., Зуев С.В., Железина Г.Ф. Исследование трибологических свойств органопластиков на основе тканого армирующего наполнителя // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №11. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.06.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-11-6-6.
9. 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.

10. Тимошков П.Н., Хрульков А.В. Современные технологии переработки полимерных композиционных материалов, получаемых методом пропитки расплавленным связующим // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №8. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.05.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-8-4-4.
11. 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.
12. Михайлов М.М. Влагопроницаемость органических диэлектриков. М.: Госэнергиздат, 1961. 163 с.
13. Перепелкин К.Е. Химические волокна: развитие производства, методы получения, свойства, перспективы. СПб.: СПГУТД, 2008. 354 с.
14. Современные машиностроительные материалы. Неметаллические материалы: справочник / под общ. ред. И.В. Горынина, А.С. Орыщенко. СПб.: Проффессионал, 2012. 916 с.
15. Высокотермоогнестойкие полиимидные волокна «Аримид», «Пион», «Твим» // ООО «ЛИРСОТ» [офиц. сайт]. URL: <http://www.lirsot.ru> (дата обращения: 01.03.2017).
16. Эшби М., Джонс Д. Конструкционные материалы. Полный курс. Долгопрудный: Интеллект, 2010. 672 с.
17. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. СПб.: Научные основы и технологии, 2013. 822 с.
18. Липатов Ю.С. Межфазные явления в полимерах. Киев: Наук. Думка, 1980. 260 с.
19. Паншин Ю.А., Малкевич С.Г., Дунаевская Ц.С. Фторопласты. Л.: Химия, 1978. 232 с.