

УДК 678.83

Г.Ф. Железина<sup>1</sup>, Г.С. Кулагина<sup>1</sup>, П.М. Шульдешова<sup>1</sup>, Т.Е. Черных<sup>2</sup>

## ОРГАНОПЛАСТИКИ НА ОСНОВЕ ТЕРМОСТОЙКИХ ПОЛИМЕРНЫХ ВОЛОКОН И МАТРИЦ

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-78-86

*Исследованы свойства термостойких полимерных волокон (Аримид, ПФБТ) и образцов органопластиков на их основе. Установлено, что полиимидные и полибензазольные волокна могут быть использованы в качестве армирующего наполнителя для создания органопластиков на рабочие температуры до 350–400 °С. Уровень сохранения значений модуля упругости при изгибе органопластика на основе волокна ПФБТ и гетероциклического связующего ИП-5 составляет 90 %. Термостойкие органопластики перспективны для использования в авиакосмической отрасли и машиностроении.*

**Ключевые слова:** органопластик, термостойкие полимерные волокна, полиимидные волокна, полибензазольные волокна, гетероциклические матрицы, метод термомеханического анализа, термостойкость.

G.F. Zhelezina<sup>1</sup>, G.S. Kulagina<sup>1</sup>, P.M. Shuldeshova<sup>1</sup>, T.E. Chernykh<sup>2</sup>

## ORGANOPLASTICS BASED ON HEAT-RESISTANT POLYMER FIBERS AND MATRICES

*The properties of heat-resistant polymer fibers (Arimid, PFBT) and samples of organoplastics based on them have been investigated. It has been established that polyimide and polybenzazole fibers can be used as a reinforcing filler to create organoplastics at operating temperatures up to 350–400 °C. The level of retention of the elastic modulus in bending of organoplastics based on PFBT fiber and IP-5 heterocyclic binder is 90 %. Heat-resistant organoplastics are promising for use in the aerospace industry and mechanical engineering.*

**Keywords:** organoplastic, heat-resistant polymer fibers, polyimide fibers, polybenzazole fibers, heterocyclic matrices, thermomechanical analysis method, heat resistance.

---

<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

<sup>2</sup>Акционерное общество Научно-производственное предприятие «Термотекс» [Joint Stock Company Research and Production Enterprise «Termoteks»]; e-mail: mail@npptermoteks.ru

### Введение

Совершенствование авиакосмической техники невозможно без повышения требований к уровню эксплуатационных нагрузок и рабочих температур узлов и деталей, изготовленных из полимерных композиционных материалов [1–3]. Для повышения весовой эффективности гиперзвуковых самолетов и космических аппаратов необходимы материалы с низкой плотностью, способные к эксплуатации при температурах до 400 °С, сохраняющие высокую работоспособность при воздействии жестких эксплуатационных факторов (эрозионные потоки твердых частиц, механические удары различной степени интенсивности и др.) [4–8]. Основным преимуществом арамидных органопластиков, широко используемых в авиационной технике, является низкая плотность (1,30–1,37 г/см<sup>3</sup>) в сочетании с высокими механическими и эксплуатационными характеристиками. Из органопластиков изготавливают легкие элементы внешнего контура самолетов и вертолетов (обшивки, зализы и др.), которые отличаются повышенной

устойчивостью к механическим повреждениям, эрозионным воздействиям, виброакустическим и усталостным нагрузкам [9, 10]. Однако для типовых авиационных органо-пластиков имеются ограничения по температуре эксплуатации – не более 180 °С. Максимальная температура эксплуатации широко применяемых конструкционных органо-пластиков (Органит 11ТЛ, ВКО-19, Органит 12Т(М)-Рус, Органит 16Т и др.) находится в диапазоне от 80 до 180 °С [11, 12]. Ограничения по максимальной температуре эксплуатации типовых авиационных органо-пластиков обусловлены химической природой используемых в их составе компонентов: арамидных волокон и эпоксидных матриц, обладающих сравнительно невысокой теплостойкостью. Кардинальное повышение уровня допустимых рабочих температур полимерных композиционных материалов возможно только при использовании в их составе волокон и связующих, более устойчивых к высокотемпературному нагреву [13, 14].

К классу полимерных термостойких волокон, сохраняющих работоспособность при температурах 350–400 °С, относятся полиимидные волокна и волокна на основе лестничных и полулестничных полимеров (полибензимидазольные, полибензтиазольные, полиоксазольные и т. п.) [15]. В табл. 1 представлены физико-механические свойства полимерных волокон различной химической структуры.

Таблица 1

Физико-механические свойства полимерных волокон

Химический класс полимера	Марка волокна	Страна разработчик	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Прочность, ГПа	Модуль упругости, ГПа	Относительное удлинение, %
Полипараарамиды	СВМ, Армос	Россия	1,45	3,5–5,5	120–150	2,5–3,5
Полибензазолы	ПФБТ	Россия	1,58	3,0–3,5	300–350	2,0–2,1
	PBZ	США	1,60	5,0–5,5	300–320	2,0–2,1
	Зилон	Япония	1,56	5,0–5,8	180–280	2,5–3,5
	М-2	Нидерланды	1,60	4,0	330	1,2
Полиимиды	Аримид С	Россия	1,43	0,7–1,2	100–120	6–10
	Аримид ВМ	Россия	1,45	1,5–2,5	120–140	2,0
Полиоксадиазолы	Оксалон	Россия	1,45	0,6–0,8	20–43	4–8
Полинафтоилен-бензимидазолы	Лола	Россия	1,45	0,6	40–80	3,0–3,5

Волокна на основе полиимидов и полибензазолов (волокна марок Аримид, Зилон, PBZ, ПФБТ, М-2) имеют наиболее высокие, по сравнению с другими термостойкими волокнами, показатели механических свойств. Полибензазольные волокна PBZ разработаны в США в 1988 г. В Японии фирмой Toyobo в 1998 г. создан процесс получения полибензазольного волокна под торговой маркой Зилон и организован их выпуск с объемом производства 1000–3000 т в год. Прочность волокна Зилон находится на уровне прочности арамидных нитей, но модуль упругости достигает значений 280 ГПа, т. е. в ~2 раза превышает этот показатель для параарамидов. Волокно отличается не только высокими значениями прочности и модуля упругости, но и хорошей термостойкостью и стойкостью к ультрафиолетовому излучению. Особенностью волокна Зилон является устойчивость к механическому удару и баллистическому воздействию.

Имеются сведения о разработке полимерного волокна с прочностью до 6300 МПа и модулем упругости до 403 ГПа (фирма Toyo Boseky). Фирма Dow Chemical (США) сообщила о получении в лабораторных условиях полимерных термостойких волокон с рекордно высокими механическими характеристиками: прочностью при растяжении 10000 МПа при модуле упругости – до 380 ГПа.

Фирма Akzo-Nobel (Нидерланды) заявила о создании полибензольного волокна марки М-5, которое отличается по химического состава от волокна Зилон. Прочность при растяжении волокна М-5 составляет 4 ГПа, а модуль упругости 330 ГПа при удлинении 1,2 %, но главным преимуществом этого волокна является повышенная прочность при сжатии 700 МПа.

Российское полибензольное волокно (ПФБТ) разработано государственным предприятием ГП «ВНИИПВ» в 1980-х гг. Получены опытные образцы с уровнем свойств: прочность при растяжении – до 3,5 ГПа, модуль упругости – до 350 ГПа, относительное удлинение – до 2,1 %, плотность 1,58 г/см<sup>3</sup>, водопоглощение – менее 0,3 %.

Полиимидные волокна, разработанные в ГП «ВНИИПВ» в 1970 г., в настоящее время выпускаются российским предприятием ООО «Лирсот» под торговой маркой Аримид. Полиимидные волокна Аримид хорошо выдерживают воздействие как высоких, так и низких температур (от –190 до +350 °С), устойчивы к действию жестких магнитных и электрических полей, выдерживают тепловой удар до 1000 °С. В настоящее время прочность отечественных полиимидных волокон доведена до 200 сН/текс (2,9 ГПа), а модуль упругости – до 230 ГПа [16].

Уровень механических свойств других термостойких российских волокон (Оксалон, Терлон, Лола, Фенилон) недостаточно высокий, чтобы рассматривать их в качестве армирующего наполнителя конструкционных органопластиков, к которым предъявляются высокие требования по прочности и жесткости. Для создания термостойких органопластиков целесообразно рассмотреть возможность использования волокон на основе полибензольных и полиимидных полимеров.

Цель данной работы – исследование свойств опытных образцов и возможность создания термостойких органопластиков, способных эксплуатироваться при температурах до 350–400 °С, за счет армирования высокопрочными волокнами на основе термостойких полимеров (полиимидов, полибензолов) в сочетании с гетероциклическими терморезистивными матрицами.

В данной статье приведены результаты исследования механических свойств термостойких полимерных армирующих волокон и модельных образцов органопластиков на их основе.

### Материалы и методы

Объектами исследования в работе являлись термостойкие полимерные волокна (полиимидное – марки Аримид, поли-*n*-фениленбистиазольное – марки ПФБТ) и опытные органопластики, изготовленные на их основе. Для проведения исследований использовали армирующие наполнители из термостойких волокон: нить марки ПФБТ с линейной плотностью 25,6 текс, нить марки Аримид ВМ с линейной плотностью 28,7 текс – партия 1; нить марки Аримид ВМ с линейной плотностью 28,9 текс – партия 2. Механические свойства исследуемых нитей представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Физико-механические свойства исследуемых армирующих наполнителей**

Свойства	Значения свойств для нитей марки		
	ПФБТ	Аримид ВМ	
		партия 1	партия 2
Линейная плотность нити, текс	25,6	28,7	28,9
Плотность волокна, г/см <sup>3</sup>	1,58	1,45	1,45
Прочность нити, МПа	2600	1600	2320
Прочность элементарного волокна, МПа	3100	–	–
Относительное удлинение при разрыве, %	2,1	2,1	2,0
Модуль упругости, ГПа	316	120	148

Поскольку для получения высоких характеристик при воздействии температур  $>300\text{ }^{\circ}\text{C}$  необходима термостойкая матрица, то для изготовления опытных образцов органопластика использовали термостойкие связующие двух типов: макрогетероциклическое связующее марки ИП-5 на основе бис-о-цианаминов и тетранитрилов ароматических тетракарбоновых кислот (разработка ФГУП «ВИАМ»); термостойкое гетероциклическое связующее марки Роливсан МВ-1М (разработка ИВС РАН) [17–21].

Связующее ИП-5 представляет собой мелкодисперсный порошок, для нанесения которого на армирующий наполнитель использовали метод электростатического напыления. В качестве полуфабриката для изготовления образцов органопластиков использовали препреги, которые получали путем нанесения мелкодисперсного порошка ИП-5 на поверхность нитей (Аримид или ПФБТ), намотанных на плоскую оправку с плотностью расположения нитей на 10 см в количестве: 50 волокон ПФБТ и 45 полиимидных нитей, с последующим оплавлением при температуре  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Формование органопластика на основе связующего ИП-5 осуществляли методом прямого прессования с конечной температурой отверждения  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Связующее Роливсан МВ-1М представляет собой высоковязкую жидкость, поэтому для нанесения на армирующий наполнитель использовали расплав связующего, которым пропитывали нити, намотанные на плоскую оправку, при температуре  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Формование модельных образцов осуществляли путем прямого прессования в ограничительных рамках предварительно собранного пакета препрега.

Для проведения исследований методом механического термического анализа изготавливали модельные образцы термостойких органопластиков размером  $16 \pm 0,5\text{ мм}$  на  $3 \pm 0,5\text{ мм}$  (толщина  $0,3\text{--}0,5\text{ мм}$ ). Для сравнения изготовлены аналогичные образцы на основе углеродных волокон, арамидных волокон и типовых эпоксидных связующих марок УП-2227 и ЭДТ-69 Н. Испытаниям подвергали образцы полимерных композитов следующего состава: волокно ПФБТ + связующее ИП-5; волокно ПФБТ + связующее Роливсан; волокно Аримид (партия 1) + связующее Роливсан; волокно Аримид (партия 2) + связующее Роливсан; волокно Аримид + связующее ИП-5; волокно ПФБТ + связующее УП-2227; волокно Русар + связующее УП-2227; волокно Армос + эпоксидное связующее ЭДТ-69Н; углеродный наполнитель ЛУ-24 + связующее ИП-5; углеродный наполнитель ЛЖУ + связующее Роливсан; углеродный наполнитель ЛЖУ + связующее ВС-2526.

Испытания модельных образцов полимерных композиционных материалов проводили методом термомеханического анализа (ТМА) на термоаналитическом комплексе модульного типа швейцарской фирмы Mettler Toledo. Определяли зависимость прочности при растяжении полимерных волокон и модуля упругости при изгибе образцов из композитов (трехточечный изгиб) от температуры. По результатам ТМА рассчитывали уровень сохранения свойств волокон и пластиков при повышенной температуре. Образцы пластиков испытывали на изгиб при скорости нагрева  $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$  при периодически действующей изгибающей нагрузке  $0,2\text{--}0,5\text{ Н}$  с частотой 1 Гц.

### Результаты и обсуждение

Методом ТМА исследовано влияние температуры на прочность при растяжении полимерных волокон различных типов. На рис. 1 показана зависимость степени сохранения прочности нитей из волокон ПФБТ и Аримид от температуры в диапазоне от  $250$  до  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  в сравнении с прочностью арамидного волокна Армос. Из представленных данных видно, что нити Аримид и ПФБТ значительно более устойчивы к нагреву, чем арамидные нити, которые сохраняют работоспособность при температуре не более  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Степень сохранения прочности армирующих нитей Аримид и ПФБТ составляет

75–89 % при температуре 350 °С, при этом термостойкость нитей ПФБТ превышает термостойкость нитей Аримид. При температуре 400 °С сохранение прочности нитей ПФБТ составляет 56 %.

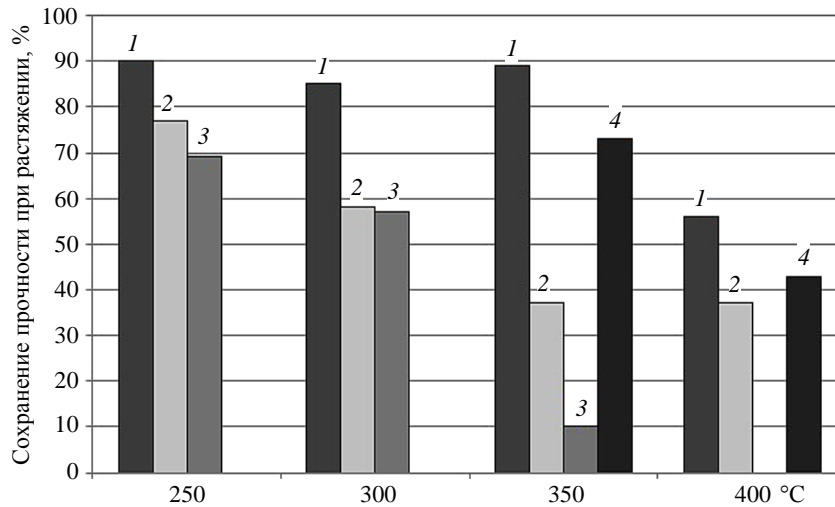


Рис. 1. Изменение прочности при растяжении полимерных волокон при нагреве: 1 – нить ПФБТ (25,6 текс); 2 – нить Аримид – партия 1 (28,7 текс); 3 – нить Армос (58,8 текс); 4 – нить Аримид – партия 2 (28,9 текс)

Исследовано влияние длительности нагрева на прочность при растяжении полимерных нитей Аримид и ПФБТ. В табл. 3 приведены значения степени сохранения прочности нитей Аримид и ПФБТ после выдержки при повышенных температурах в течение 15–100 ч (испытания после экспозиции проведены при температуре 20 °С). Установлено, что при увеличении продолжительности нагрева происходит снижение прочности нитей, при этом сохранение прочности нитей Аримид после 15 ч нагрева при температуре 400 °С составляет 34–40 %, нитей ПФБТ: 50 %.

Таблица 3

**Влияние температуры и продолжительности выдержки на сохранение прочности нитей Аримид и ПФБТ**

Тип полимерного волокна	Сохранение прочности при растяжении, %, при температуре и продолжительности выдержки, °С/ч		
	300/100	350/50	400/15
Нить ПФБТ (25,6 текс)	85	76	50
Нить Аримид – партия 2 (28,9 текс)	70–80	–	34–40

Методом термогравиметрического анализа исследованы процессы термодеструкции нитей ПФБТ и Аримид. В табл. 4 и 5 приведены значения температуры, характерные для различных стадий деструкции волокон. Как следует из представленных данных, термическая деструкция нитей ПФБТ и Аримид начинается при температуре >500 °С и интенсивно проходит при температурах 670–700 °С.

Таблица 4

**Термоокислительная стойкость нитей Аримид**

Тип нити	Температура начала деструкции, °С	Температура максимальной скорости потери массы, °С	Кислородный индекс, %
Нить Аримид – партия 2 (28,9 текс)	520	650	50–60

Таблица 5

## Термоокислительная стойкость арамидных волокон СВМ и волокон ПФБТ

Тип нити	Температура, °С				Потери массы, %	
	начала деструкции	2%-ной потери массы	максимальной скорости потери массы	окончания процесса деструкции	в момент максимальной скорости процесса	полное значение
СВМ	415	450	535	590	54	95,5
ПФБТ	515	565	658	695	63	94,5
Нить Аримид – партия 2 (28,9 текс)	520	–	650	–	50–60	

Таким образом, полученные результаты исследования свойств термостойких волокон ПФБТ и Аримид дают основание предположить возможность их использования в качестве армирующего наполнителя для композитов, способных эксплуатироваться при температурах до 350–400 °С. Для реализации высокой термостойкости полиимидных и полибензольных волокон в составе композиционного материала необходимо использовать термостойкие полимерные связующие.

На рис. 2 показано влияние температуры на сохранение жесткости при изгибе модельных образцов органопластиков, изготовленных на основе термостойких (ИП-5, Роливсан МВ-1М) и модифицированных эпоксидных связующих (ЭДТ-69Н, УП-2227). В качестве армирующего наполнителя использовали термостойкие волокна Аримид и ПФБТ, а для сравнения – арамидные волокна Армос и Русар. Значения степени сохранения жесткости модельных органопластиков в диапазоне температур от 250 до 400 °С рассчитаны по экспериментальным кривым, полученным методом ТМА.

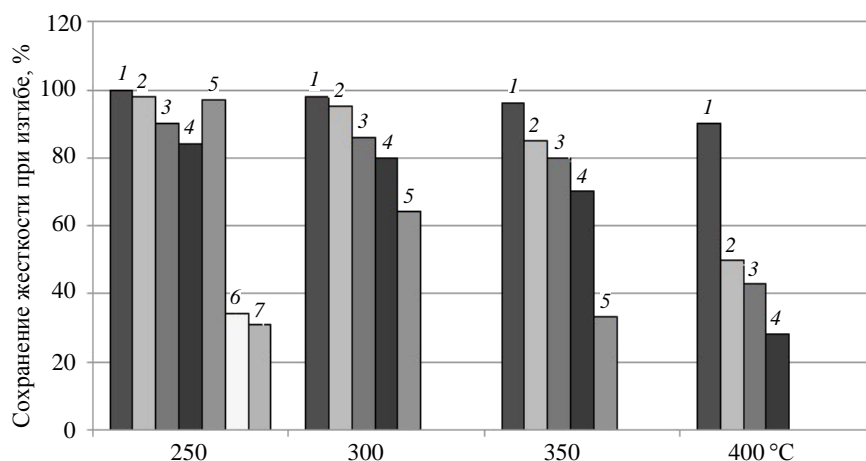


Рис. 2. Влияние состава органопластика на степень сохранения жесткости при изгибе при температуре: 1 – волокно ПФБТ + связующее ИП-5; 2 – волокно ПФБТ + связующее УП-2227; 3 – волокно Аримид (партия 1) + связующее Роливсан; 4 – волокно Аримид (партия 2) + связующее Роливсан; 5 – волокно ПФБТ + связующее Роливсан; 6 – волокно Русар + связующее УП-222; 7 – волокно Армос + связующее ЭДТ-69Н

На рис. 3 представлена зависимость степени сохранения жесткости при изгибе от температуры модельных образцов органопластиков. Термостойкое волокно ПФБТ в сочетании с термостойким связующим ИП-5 показывает стабильный уровень сохранения жесткости при изгибе при температурах от 100 до 600 °С.

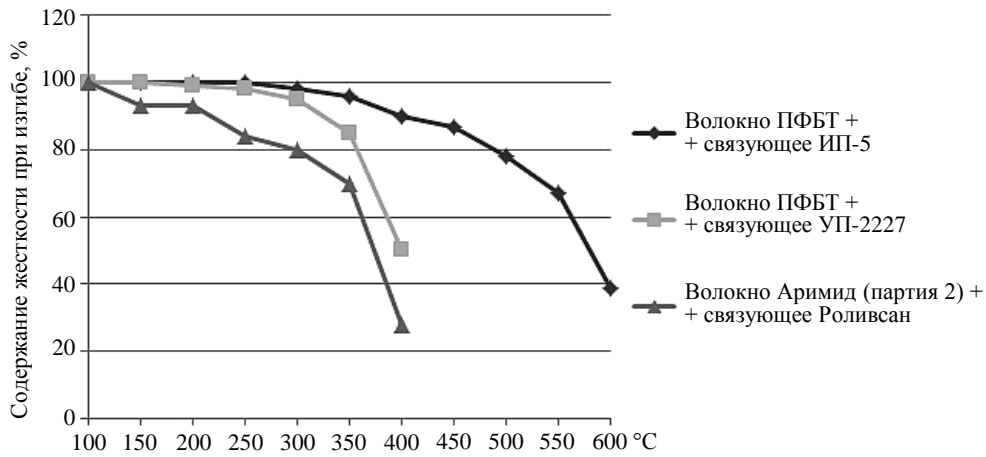


Рис. 3. Зависимость сохранения жесткости при изгибе от температуры

Из приведенных в данных следует, что наибольшую термостойкость проявляют органопластики на основе волокна ПФБТ и связующего ИП-5: при температуре 400 °С степень сохранения жесткости этих органопластиков в 2–3 раза больше, чем у остальных материалов, и составляет 90 %. Снижение жесткости органопластика на основе волокна ПФБТ начинается при температуре >500 °С, в то время как резкое падение жесткости органопластиков на основе арамидных волокон (Армос, Русар) начинается с 200 °С.

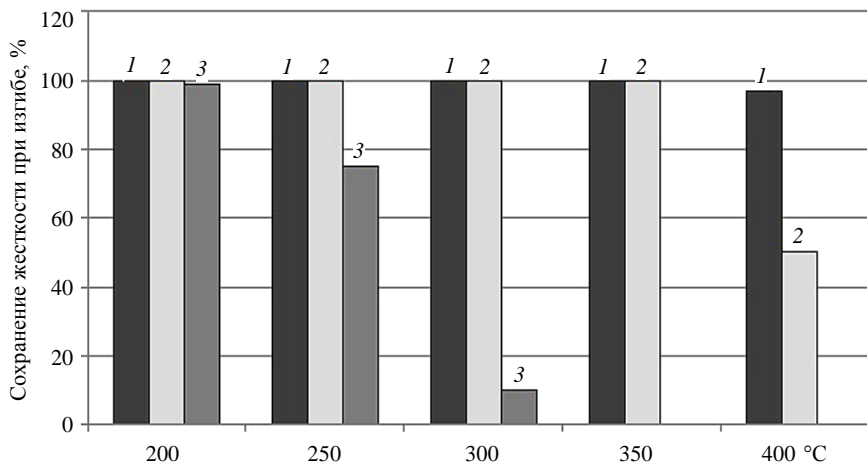


Рис. 4. Влияние состава углепластика на степень сохранения жесткости при изгибе при температуре: 1 – углеродный наполнитель ЛУ-24 + связующее ИП-5; 2 – углеродный наполнитель ЛЖУ + связующее Роливсан; 3 – углеродный наполнитель ЛЖУ + связующее ВС-2526

Для сравнительной оценки термодформационной устойчивости органопластиков, армированных термостойкими полимерными волокнами, проведены термомеханические исследования модельных образцов углепластиков на основе аналогичных матриц. Установлено, что степень сохранения жесткости при температуре 400 °С модельных образцов углепластика на основе связующего ИП-5 составляет 95 % (рис. 4). Сравнение полученных результатов с приведенными ранее показывает, что органопластик на основе нитей ПФБТ практически не уступает углепластику на основе термостойкого связующего ИП-5 по степени сохранения жесткости при нагреве.

Эти данные свидетельствуют о возможности использования термостойких полимерных волокон для создания органопластиков, сохраняющих работоспособность при температурах до 350–400 °С.

### Заключения

Проведен анализ свойств термостойких полимерных волокон на соответствие требованиям, предъявляемым к армирующим наполнителям полимерных композитов для эксплуатации в условиях экстремальных тепловых воздействий. Установлено, что по уровню механических и технологических характеристик полиимидные волокна Аримид и полибензасольные волокна ПФБТ могут быть использованы в качестве армирующего наполнителя для создания композитов на рабочие температуры до 350–400 °С. Волокна ПФБТ отличается высокой стойкостью к поглощению влаги (водопоглощение 0,3 %) и имеют прочность при растяжении – до 3100 МПа, модуль упругости – до 316 ГПа, относительное удлинение 2,1 %, плотность 1,58 г/см<sup>3</sup>. Уровень свойств термостойких полиимидных волокон для армирования органопластиков следующий: прочность при растяжении – до 2,32 ГПа, модуль упругости – до 148 ГПа, относительное удлинение 2,0 %, плотность 1,45 г/см<sup>3</sup>.

Проведены исследования методом ТМА термостойкости органопластиков на основе волокон Аримид и ПФБТ и гетероциклических связующих ИП-5 и Роливсан. Установлено, что органопластик на основе волокна ПФБТ и связующего ИП-5 обладает наиболее высокой устойчивостью к нагреву: степень сохранения значения модуля упругости при изгибе составляет 90 % при температуре 400 °С.

Проведенные исследования свидетельствуют о возможности создания органопластиков, способных эксплуатироваться при температурах до 350–400 °С путем армирования высокопрочными волокнами типа Аримид и ПФБТ в сочетании с гетероциклическими терморезактивными матрицами. Термостойкие органопластики являются перспективными материалами для использования в авиакосмической отрасли и машиностроении.

### Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. материалов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
2. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 6. С. 520–530.
3. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // Редкие земли. 2014. № 3. С. 8–13.
4. Гуняева А.Г., Курносоев А.О., Гуляев И.Н. Высокотемпературные полимерные композиционные материалы, разработанные во ФГУП «ВИАМ», для авиационно-космической техники: прошлое, настоящее, будущее (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 1 (95). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.04.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53.
5. Zhang S., Zhao D. Advances in materials science and engineering. Aerospace materials handbook. CRC Press, 2012. 781 p.
6. 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. 3–30. DOI: 10.18577/2071-9140-20175-0-1-3-33.
7. Ерасов В.С., Котова Е.А. Эрозионная стойкость авиационных материалов к воздействию твердых (пылевых) частиц // Авиационные материалы и технологии. 2011. № 3. С. 30–36.
8. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.

9. 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.
10. Железина Г.Ф., Войнов С.И., Соловьева Н.А., Кулагина Г.С. Арамидные органотекстолиты для ударостойких авиационных конструкций // *Журнал прикладной химии*. 2019. Т. 92. Вып. 3. С. 358–364. DOI: 10.1134/S0044461819030101.
11. Шульдешова П.М., Деев И.С., Железина Г.Ф. Особенности разрушения арамидных волокон СВМ и конструкционных органопластиков на их основе // *Труды ВИАМ*. 2016. № 2 (38). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-11-11.
12. Железина Г.Ф., Гуляев И.Н., Соловьева Н.А. Арамидные органопластики нового поколения для авиационных конструкций // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 368–378. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-368-378.
13. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. СПб.: Научные основы и технологии, 2018. 822 с.
14. Деев И.С., Каблов Е.Н., Кобец Л.П., Чурсова Л.В. Исследование методом сканирующей электронной микроскопии деформации микрофазовой структуры полимерных матриц при механическом нагружении // *Труды ВИАМ*. 2014. № 7. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.04.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-6-6.
15. Михайлин Ю.А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов. СПб.: Научные основы и технологии, 2011. 416 с.
16. Перепелкин К.Е. Химические волокна: развитие производства, методы получения, свойства, перспективы. СПб.: СПГУТД, 2008. 354 с.
17. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 3 (56). С. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
18. Аронович Д.А., Гладких С.Н., Малышева Г.В., Мотовилин Г.В. Склеивание в машиностроении: справочник: в 2 т. М.: Наука и технологии, 2005. 244 с.
19. Петрова А.П., Малышева Г.В. Клеи, клеевые связующие и клеевые препреги: учеб. пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2017. 472 с.
20. Раскутин А.Е., Давыдова И.Ф., Мухаметов Р.Р., Минаков В.Т. Новое термостойкое связующее для стекло- и углепластиков // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2007. № 11. С. 20–23.
21. Железняк В.Г., Мухаметов Р.Р., Чурсова Л.В. Исследование возможности создания термореактивного связующего на рабочую температуру до 400 °С // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. № S2. С. 58–61.