



УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-9-9

ПЕНОПОЛИИМИДЫ

Е.Н. Каблов

доктор технических наук, Академик РАН

Э.Я. Бейдер

кандидат технических наук

Г.Н. Петрова

кандидат технических наук

Ю.В. Столянков

кандидат технических наук

Т.В. Румянцева

Апрель 2015

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-9-9

Е.Н. Каблов¹, Э.Я. Бейдер¹, Г.Н. Петрова¹, Ю.В. Столянков¹, Т.В. Румянцева¹

ПЕНОПОЛИИМИДЫ

Описаны физико-механические и теплофизические свойства вспененных полимерных материалов отечественного производства – эластичного (ВПП-1) и жесткого листового (ВПП-5), созданных для замены импортного эластичного пенополиимида марки «Solimide» (США) и жесткого листового метакрилимидного пенопласта марки «Rohacell» (Германия). Свойства отечественных пенополиимидов марок ВПП-1 и ВПП-5 сравниваются со свойствами зарубежных аналогов. Приводится описание способа изготовления образцов для испытаний из пенополиимида на разработанном в ВИАМ устройстве для механической обработки вспененных полимерных материалов. Даны рекомендации по применению разработанных пенополиимидов марок ВПП-1 и ВПП-5.

Ключевые слова: полимерный материал, вспенивание, эластичный, жесткий, пенополиимид, импортозамещение, многослойная панель, механическая обработка.

E.N. Kablov, E.Y. Bejder, G.N. Petrova, Yu.V. Stolyankov, T.V. Rummyantseva

FOAMED POLYIMIDES

The physical, mechanical and thermo-physical properties of the domestic foamed elastic VPP-1 and rigid plate-type VPP-5 polymer materials produced to substitute the foreign foamed elastic «Solimide» (USA) and rigid plate-type «Rohacell» (Germany) polyimide materials are described in the article. Properties of the domestic foamed VPP-1 and VPP-5 polyimide materials are compared with foreign foamed polyimide analogue materials. The description of the manufacturing method for the foamed polyimide test specimens on the foamed polymeric materials mechanical treatment equipment developed in VIAM is provided. The recommendations on application of the domestic foamed polyimide materials VPP-1 and VPP-5 are given as well.

Keywords: polymeric material, foaming, elastic, rigid, foamed polyimide, import substitution, multilayered panel, mechanical treatment.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

Развитие современной авиационной отрасли выдвинуло ряд новых требований к материалам [1–3], среди которых одними из важнейших являются: увеличение устойчивости, жесткости и обтекаемости конструкций внешних обводов планера самолета. В то же время требования по снижению массы конструкций, стоимости их изготовления остаются неизменными.

Эти проблемы, в зависимости от конструктивных и эксплуатационных задач, могут решаться по-разному: например, можно увеличить толщину обшивки или подкрепить ее силовым каркасом и т. д. Наряду с этим нашли применение легкие и прочные трехслойные конструкции, которые, обладая минимальной массой благодаря применению тонких обшивок из стекло- или углепластика [4, 5] и легких наполнителей, обеспечивают достаточно большую устойчивость, жесткость и хорошую обтекаемость изделий в условиях полета [6].

В качестве легкого наполнителя могут использоваться полимерные и металлические соты, сферопластики, газонаполненные полимеры.

В последние годы в качестве легкого наполнителя трехслойных панелей в авиационной технике стали применяться пенопласты: в странах Западной Европы, США и Японии – пенопласты на основе полиимидных смол, в России – на основе фенолформальдегидных смол, чистых и модифицированных каучуками.

В этой связи особый интерес представляют пенопласты на основе полиимидов. Полиимиды относятся к полимерным материалам нового поколения, обладающим комплексом уникальных эксплуатационных свойств: пожаробезопасностью [7], высокими прочностными свойствами, низкой газопроницаемостью, коррозионной инертностью, грибостойкостью, устойчивостью к радиационному воздействию и УФ лучам, прекрасными диэлектрическими свойствами, работоспособностью в интервале температур от -196 до $+250-350^{\circ}\text{C}$ [8].

Уникальный комплекс свойств, присущий полиимидам [9], обусловлен жесткой структурой, которая состоит из бензольного кольца, прочно соединенного с двумя пятичленными азотсодержащими циклами.

На протяжении нескольких десятилетий полимеры этого класса удерживают первенство среди материалов, из которых в настоящее время произведен огромный ассортимент изделий для всех отраслей науки и техники [10]. На основе полиимидов получают пленки, волокна, покрытия, лаки, пластмассы, мембраны, композиты, связую-

щие, пено- и пороматериалы. Каждый из них может работать в термоэкстремальных условиях.

Пеноматериалами на основе пенополиимидов стали заниматься 40–50 лет назад и в настоящее время они нашли широкое применение в изделиях фирм «Боинг», «Аэрбас», практически во всех вертолетах и т. д.

Одним из приоритетных направлений в области создания перспективных полиимидных материалов является получение пеноматериалов вспениванием форполимера.

Под вспениванием материала понимается формирование замкнуто-пористой ячеистой структуры материала с заполнением воздухом или каким-либо другим газообразным веществом. Таким образом, формируются пены, характерной чертой которых является замкнуто-пористая ячеистая структура. Ячеистая структура образуется из-за выделения газообразных продуктов вследствие физико-химических процессов при взаимодействии или испарении (процессы десорбции) компонентов формирующегося пеноматериала [11, 12].

Свойства пенопластов зависят от химического состава макромолекул, степени их сшивки, соотношения полимерной и газовой фаз, размеров газовых ячеек и степени однородности пенопласта, химического состава газовспенивателя, наличия не входящих в состав макромолекул, но содержащихся в полимерной фазе добавок, их количества и распределения по объему материала [13]. Иными словами, свойства вспененного материала во многом определяются свойствами полимерных продуктов – форполимеров.

В авиакосмической и атомной промышленности применяют два вида полиимидных пеноматериалов:

- жесткие (листовые) – для изготовления изделий конструкционного и радиотехнического назначения;
- мягкие (эластичные) – для использования в качестве теплоизоляции.

Жесткие полиимидные пены имеют изотропную ячеистую структуру. Они выполняют роль каркаса в ходе вспенивания и сборки.

Мягкие эластичные пены на основе полиимидов обладают низкой плотностью, устойчивы к горению, имеют высокие характеристики по тепло- и звукоизоляции и широкий диапазон рабочих температур – от -196 до $+250^{\circ}\text{C}$ [14, 15].

Мировыми лидерами в поставках широкого ассортимента жестких листовых полиимидных пеноматериалов конструкционного и радиотехнического назначения является фирма Evonik Rohm (Германия), гибких (эластичных) полиимидных пеноматериалов – фирма Jenifer (Франция). Жесткий листовой пенополиимид выпускается под мар-

кой Rohacell (более 10 разновидностей), листовой эластичный пенополиимид – под маркой «Solimide».

Материалы и методы испытаний

В данной статье представлены результаты квалификационных испытаний отечественных пенополиимидов: трудносгорающего эластичного пенополиимида марки ВПП-1 (ТУ1-595-9-185–2011) (рис. 1) и листового пеноакрилимида марки ВПП-5 (ТУ1-595-9-1447–2014).

Испытания проводили на стандартных образцах пенополиимидов, изготовленных по разработанному режиму. Сначала по двухстадийному технологическому процессу (вспенивание+имидизация) из форполимеров получали блоки пенопластов размером 50×200×200 мм. Далее путем механической обработки на разработанном авторами устройстве [16, 17] (рис. 2) изготавливали образцы: снимали «корку» (рис. 3), нарезали пластины необходимой толщины (рис. 4) и затем – вырезали образцы требуемых размеров.



Рис. 1. Эластичный пенополиимид марки ВПП-1



Рис. 2. Устройство для механической обработки вспененных полимерных материалов



Рис. 3. «Корка», снятая с поверхности вспененного полимерного материала

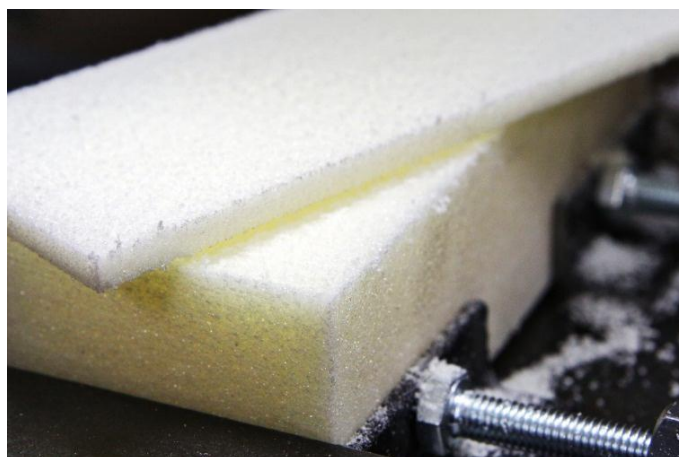


Рис. 4. Пластина из вспененного полимерного материала

Исследование свойств пенопластов проводили по стандартным методикам:

- плотность (кг/м^3) по ГОСТ 409–77, гигроскопичность (%) по ГОСТ 8971–78;
- разрушающее напряжение при сжатии $\sigma_{\text{сж}}$ (МПа) по ГОСТ 23206–78;
- максимальное напряжение при растяжении $\sigma_{\text{раст}}$ (МПа) и относительное удлинение при разрыве $\epsilon_{\text{разр}}$ (%) по ГОСТ 17370–71;
- коэффициент теплопроводности λ ($\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) и коэффициент температуропроводности $a \cdot 10^6$ ($\text{м}^2/\text{с}$) по ГОСТ 23630.2–79;
- пожаробезопасные свойства (горючесть, дымообразование, тепловыделение по нормам АП-25 Приложение F, Части I, IV и V);
- диэлектрические свойства ($\text{tg}\delta$, ϵ) по ГОСТ 6433.1–71.

Результаты

Трудногорающий эластичный пенополиимид марки ВПП-1 представляет собой продукт вспенивания порошкового форполимера на основе ангидрида бензофенолтетракарбоновой кислоты и смеси диаминов (ТУ001-225341-02698594–10).

Основные свойства пенополиимида ВПП-1 представлены в табл. 1–3.

Таблица 1

Физические свойства пенополиимида ВПП-1

Свойства	Значения свойств
Внешний вид	Пеноматериал с мелкоячеистой структурой желтого цвета
Плотность, кг/м ³	8–15
Эластичность по ШГ, мм (ГОСТ 6806–73)	1
Эластичность по Эриксену, мм (ГОСТ 29309–92)	26–27
Гигроскопичность (ГОСТ 8971–78), %, при выдержке, сут:	
1	3
10	12,3
30	12,3

Как и все полиимиды, пенополиимиды относятся к числу слабодымящих трудносгорающих материалов. Теплопроводность пенополиимида ВПП-1 при температурах от 0 до 50°C находится в диапазоне 0,043–0,046 Вт/(м·К).

В табл. 2 приведены свойства пенопласта ВПП-1 после теплового старения при разных температурах.

Таблица 2

Механические свойства пенополиимида ВПП-1 после теплового старения (ГОСТ 9.715)

Тепловое старение: температура, °С/выдержка, ч	Остаточная деформация при сжатии, %	Гибкость, мм (при толщине 10 мм)	Потеря массы, %
В исходном состоянии	5,6	От 1,0	–
200/500	–	От 1,0	2,0
200/750	0,65	От 1,0	3,0
230/100	3,0	От 15	2,5
250/10	3,0	От 20	3,0
250/50*	3,5	От 15	2,5

* При одностороннем подводе тепла.

Свойства полиимидного пенопласта ВПП-1, отечественного прототипа полиуретанового эластичного пенопласта ПУ-107 и аналога – полиимидного пенопласта «Solimide» (США) представлены в табл. 3.

Таблица 3

Свойства эластичных пенопластов*

Свойства	Значения свойств пенопласта марки		
	ВПП-1	ПУ-107	«Solimide» (США)
Плотность, кг/м ³	8–15	19–21	7–15
Теплопроводность, Вт/(м·К), при 150°C	0,051	0,057	0,072
Диапазон рабочих температур, °С	-60÷+250	-60÷+200	-190÷+200
Время остаточного горения, с	0	15	0
Категория горючести	Трудносгорающий	Самозатухающий	Трудносгорающий
Эластичность	Эластичный	Жесткий	Эластичный

* Испытания проведены при участии Е.В. Гуревой (см. табл. 1–3).

Из данных табл. 3 видно, что разработанный пенополиимид ВПП-1 значительно превосходит по свойствам (и прежде всего по теплостойкости) пенополиуретан отече-

ственного производства марки ПУ-107 и находится на одном уровне с зарубежным аналогом – пенополиимидом марки «Solimide».

Пеноакрилимид листовой марки ВПП-5 представляет собой продукт вспенивания листового форполимера на основе акрилимида (ТУ2216-558-00208947–2014) [9]. В качестве вспенивателя использован третбутиловый спирт.

Свойства пеноакрилимида марки ВПП-5 показаны на рис. 5, а также в табл. 4–7 (испытания проведены при участии Н.М. Скляревской.)

Пенопласт марки ВПП-5 выпускается плотностью от 50 до 100 кг/м³.

Таблица 4

Тепловое старение пеноакрилимида ВПП-5* (ГОСТ 9.715–86)

Плотность, кг/м ³	Предел прочности при сжатии, МПа, после выдержки (температура, °C/продолжительность, ч)					
	150/500	150/1000	180/50	180/100	200/500	200/50
55±5	1	0,7	1	1	0,4	0,8
90±5	1,4	1,1	2,43	2,1	0,3	1,3

* Испытания проводили при 20°C.

Из данных рис. 5 следует, что механические свойства пенопласта ВПП-5 зависят от его плотности и температуры.

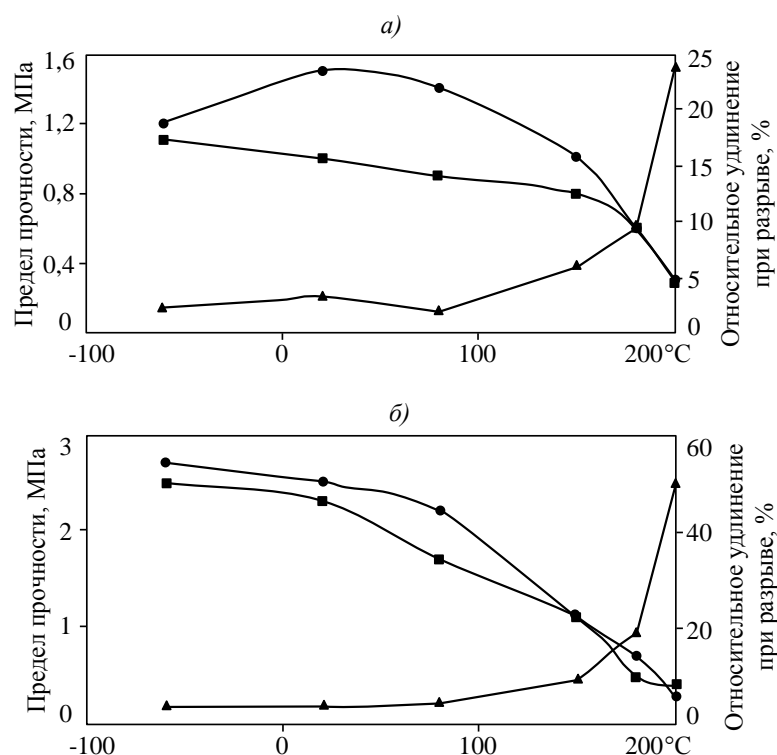


Рис. 5. Температурные зависимости механических свойств пенопласта марки ВПП-5 плотностью 55±5 (а) и 90±5 кг/м³ (б):

■ – предел прочности при сжатии; ● – максимальный предел прочности при растяжении; ▲ – относительное удлинение при разрыве

Из данных табл. 5 и 6 видно, что изделия из пеноакрилимиды марки ВПП-5 могут эксплуатироваться в интервале температур от -60 до +150°C, кратковременно (до 50 ч) – при 180°C. Пеноакрилимид ВПП-5 обладает низким значением тепло- и температуропроводности (см. табл. 5).

Таблица 5

Коэффициенты тепло- (λ) и температуропроводности (a) пеноакрилимиды ВПП-5

Свойства	Плотность, кг/м ³	Значения свойств при температуре, °C					
		-60	-20	0	+20	+70	+100
λ , Вт/(м·К)	55±5	0,047	0,060	0,65	0,069	0,083	0,095
	90±5	0,094	0,105	0,111	0,116	0,129	0,136
$a \cdot 10^6$, м ² /с	55±5	0,48	0,52	0,54	0,49	0,44	0,57
	90±5	0,59	0,56	0,57	0,50	0,41	0,50

Как и все полиимиды, пенопласты на их основе обладают превосходными диэлектрическими характеристиками (см. табл. 6).

Таблица 6

Диэлектрические свойства пеноакрилимиды ВПП-5 при температуре 20°C

Свойства	Значения свойств при плотности материала, кг/м ³	
	55±5	100±5
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 10 ¹⁰ Гц	0,003	0,005
Диэлектрическая проницаемость при частоте 10 ¹⁰ Гц	1,1	1,2
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·м	2,9·10 ¹¹	–
Удельное поверхностное электрическое сопротивление, Ом	1,0·10 ¹⁴	–

В ходе выполнения работы также проведены исследования пожаробезопасных свойств пеноакрилимиды марки ВПП-5. Установлено, что пенопласт марки ВПП-5 относится к числу самозатухающих полимеров (время остаточного горения составляет ~2 с), однако при горении выделяет большое количество дыма (сильнодымный). В табл. 7 приведены сравнительные свойства пенопластов, применяемых в авиационной технике России (ФК-20), США и Западной Европы (Rohacell WF).

Таблица 7

Сравнительные свойства пенопластов марок ВПП-5, ФК-20 и Rohacell WF

Свойства	Значения свойств пенопластов							
	ВПП-5			ФК-20**		Rohacell WF***		
Плотность, кг/м ³	55±5	90±5	100±5	60	100	52	110	
Толщина, мм	50–70			–	–	4–75	4–50	
Предел прочности при растяжении, МПа, при температуре, °C:	20	1,4	2,5	3,0	0,35	1,3	1,6	3,7
	130	1,0*	1,1*	–	0,23	0,43	–	–
Предел прочности при сжатии, МПа, при температуре, °C:	20	1,0	2,5	3,0	0,28	0,38	0,8	3,6
	130	0,8*	1,1*	–	0,18	0,26	–	–
Диэлектрическая проницаемость при частоте 10 ¹⁰ Гц	1,1	–	1,2	–	–	1,067	–	
Горючесть	Самозатухающий					Горючий		

* Испытания при температуре 150°C.

** Справочные данные.

*** Данные из проспекта фирмы Evonic Rohm GmbH (Германия).

Из данных табл. 7 видно, что разработанный пеноакрилимид марки ВПП-5 значительно превосходит отечественный прототип – пенопласт ФК-20 – по прочности и теплостойкости и находится на уровне зарубежного аналога пенометакрилимиды марки Rohacell WF. По структуре (рис. 6) и размерам ячеек (табл. 8) отечественный пеноакрилимид марки ВПП-5 и его зарубежный аналог марки Rohacell практически не отличаются друг от друга.

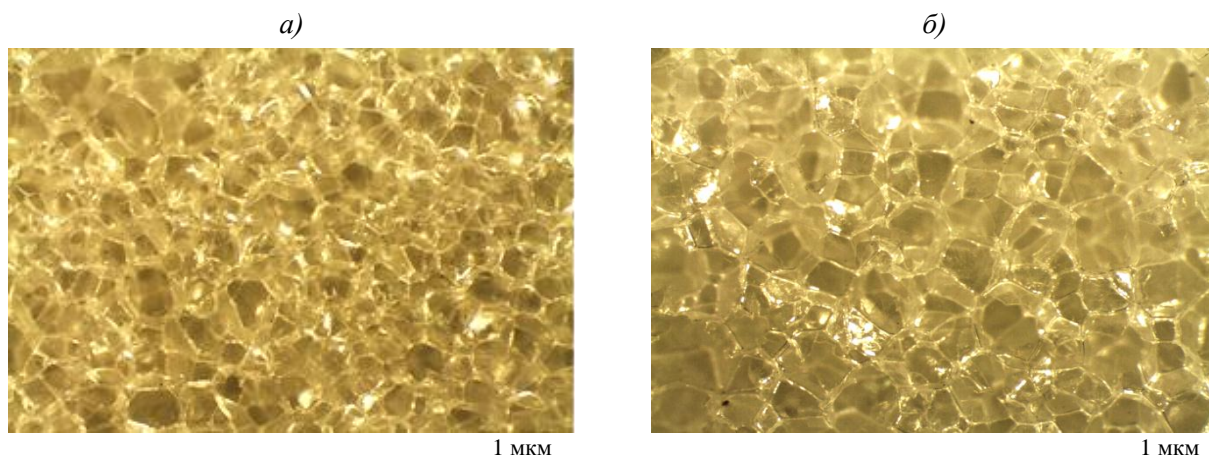


Рис. 6. Структура жестких пенопластов марок ВПП-5 (а) и Rohacell WF (б)

Таблица 8

Средний размер ячеек жестких пенополиимидов марок ВПП-5 и Rohacell

Плотность, кг/м ³	Диаметр (средний), мм
43	0,722±0,009
51	0,716±0,010
51 (Rohacell)	0,736±0,014
54	0,493±0,004
77,5	0,478±0,005
97,3	0,425±0,003

Обсуждение и заключения

Проведенные квалификационные испытания показали, что:

1. Разработанный эластичный пенополиимид марки ВПП-1 обладает в сравнении с пенополиуретаном марки ПУ-107 аналогичного назначения следующими квотами превосходства:

- сниженной в 2,1 раза плотностью;
- повышенной на 50°С температурой эксплуатации;
- пониженной в 1,1 раза теплопроводностью;
- сниженной горючестью.

2. Разработанный листовой пеноакрилимид марки ВПП-5 обладает следующими квотами превосходства в сравнении с пенопластом аналогичного назначения марки ФК-20:

- в 2–4 раза повышенной прочностью при растяжении и сжатии;
- повышенной на 20°C рабочей температурой (до 150°C).

Проведенные исследования позволили рекомендовать пенополиимид ВПП-1 в чистом виде, а также облицованным тонкой полиимидной пленкой, в качестве теплоизоляции пневмо-, масло- и гидросистем для авиакосмической техники, в том числе трубопроводов сложной конфигурации, элементов системы кондиционирования воздуха летательных аппаратов. Материал марки ВПП-1 может эксплуатироваться в интервале температур от -60 до +250°C. При температуре 250°C материал может работать до 10 ч, а при одностороннем подводе тепла – до 50 ч.

Пеноакрилимид листовой марки ВПП-5 может быть рекомендован в качестве легкого заполнителя для получения трехслойных панелей сложной конфигурации (с двойной кривизной) конструкционного, радиотехнического назначения, а также в качестве теплозащиты. Материал марки ВПП-5 может эксплуатироваться в интервале температур от -60 до +150°C. При температуре 180°C материал может работать до 50 ч.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России //Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
2. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
3. Каблов Е.Н. Разработки ВИАМ для газотурбинных двигателей и установок //Крылья Родины. 2010. №4. С. 31–33.
4. Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н., Изотова Т.Ф., Барботько С.Л. Стеклопластики на термопластичной матрице //Труды ВИАМ. 2013. №7. Ст. 03 (viam-works.ru).
5. Столянков Ю.В., Исходжанова И.В., Антюфеева Н.В. К вопросу о дефектах образцов для испытаний углепластиков //Труды ВИАМ. 2014. №10. Ст. 10 (viam-works.ru).
6. Дорошенко Н.И., Чурсова Л.В. Эволюция материалов для лопастей вертолетов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 16–18.
7. Петрова Г.Н., Румянцева Т.В., Бейдер Э.Я. Влияние модифицирующих добавок на пожаробезопасные свойства и технологичность поликарбоната //Труды ВИАМ. 2013 №6. Ст. 06 (viam-works.ru).
8. Доброхотова М.Л. и др. Полиимиды: Справочник по пластическим массам. М.: Химия. 1969. С. 317–325.
9. ПМИ – пены с исключительными характеристиками //Пластикс. 2007. №10. С. 1–2.

10. Крутько Э.Т., Прокопчук Н.Р. Перспективные пути создания новых термостойких материалов на основе полиимидов //Труды БГТУ. 2013. №4. Химия, технология органических веществ и биотехнологии. С. 145–149.
11. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб.: Профессия. 2006. 623 с.
12. Корниенко П.В., Ширшин К.В. и др. Получение вспененных полиимидных материалов на основе акрилонитрила и метакриловой кислоты //Пластические массы. 2013. №6. С. 4–17.
13. Берлин А.А., Шутов Ф.А. Химия и технология газонаполненных высокополимеров. М.: Наука. 1980. 504 с.
14. Бейдер Э.Я., Гуреева Е.В., Петрова Г.Н. Пенополиимиды //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №6. С. 2–8.
15. Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н., Изотова Т.Ф., Гуреева Е.В. Композиционные термопластичные материалы и пенополиимиды //Труды ВИАМ. 2013. №11. Ст. 01 (viam-works.ru).
16. Столянков Ю.В., Бейдер Э.Я., Платонов М.М., Петрова Г.Н. Устройство для механической обработки вспененных полимерных материалов //Труды ВИАМ. 2015 (в печати).
17. Устройство для механической обработки вспененных полимерных материалов: пат. №145916. Рос. Федерация; опубл. 27.09.2014.

REFERENSES LIST

1. Kablov E.N. Sovremennye materialy – osnova innovacionnoj modernizacii Rossii [Modern materials – basis of innovative modernization of Russia] //Metally Evrazii. 2012. №3. S. 10–15.
2. Kablov E.N. Himija v aviacionnom materialovedenii [Chemistry in aviation materials science] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2010. T. LIV. №1. S. 3–4.
3. Kablov E.N. Razrabotki VIAM dlja gazoturbinnyh dvigatelej i ustanovok [Development of VIAM for gas turbine engines and installations] //Kryl'ja Rodiny. 2010. №4. S. 31–33.
4. Bejder Je.Ja., Petrova G.N., Izotova T.F., Barbot'ko S.L. Stekloplastiki na termoplastichnoj matrice [Fibreglasses on thermoflexible matrix] //Trudy VIAM. 2013. №7. St. 03 (viam-works.ru).
5. Stoljankov Ju.V., Ishodzhanova I.V., Antjufeeva N.V. K voprosu o defektah obrazcov dlja ispytanij ugleplastikov [To question of defects of test pieces ugleplastikov] //Trudy VIAM. 2014. №10. St. 10 (viam-works.ru).
6. Doroshenko N.I., Chursova L.V. Jevoljucija materialov dlja lopastej vertoletov [Evolution of materials for blades of helicopters] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №2. S. 16–18.
7. Petrova G.N., Rumjanceva T.V., Bejder Je.Ja. Vlijanie modificirujushhih dobavok na pozharobezopasnye svojstva i tehnologichnost' polikarbonata [Influence of modifying additives on fireproof properties and technological effectiveness of polycarbonate] //Trudy VIAM. 2013 №6. St. 06 (viam-works.ru).

8. Dobrohotova M.L. i dr. Poliimidy [Polyimide]: Spravochnik po plasticheskim massam. M.: Himija. 1969. S. 317–325.
9. PMI – peny s iskljuchitel'nymi harakteristikami [PMI – foams with exclusive characteristics] //Plastiks. 2007. №10. S. 1–2.
10. Krut'ko Je.T., Prokopchuk N.R. Perspektivnye puti sozdaniya novyh termostojkih materia-lov na osnove poliimidov [Perspective ways of creation of new heat-resistant materials on the basis of polyimide] //Trudy BGTU. 2013. №4. Himija, tehnologija organicheskikh veshhestv i biotehnologii. S. 145–149.
11. Mihajlin Ju.A. Termoustojchivye polimery i polimernye materialy [Thermosteady polymers and polymeric materials]. SPb.: Professija. 2006. 623 s.
12. Kornienko P.V., Shirshin K.V. i dr. Poluchenie vspenennyh poliimidnyh materialov na osnove akrilonitrila i metakrilovoj kisloty [Receiving frothed polyimide materials on basis akrilonitrila and methacrylic acid] //Plasticheskie massy. 2013. №6. S. 4–17.
13. Berlin A.A., Shutov F.A. Himija i tehnologija gazonapolnennyh vysokopolimerov [Chemistry and technology of gas-filled high polymers]. M.: Nauka. 1980. 504 s.
14. Bejder Je.Ja., Gureeva E.V., Petrova G.N. Penopoliimidy [Penopoliimidy] //Vse materialy. Jenciklopediche-skij spravochnik. 2012. №6. S. 2–8.
15. Bejder Je.Ja., Petrova G.N., Izotova T.F., Gureeva E.V. Kompozicionnye termoplastichnye materialy i penopoliimidy [Composite thermoflexible materials and penopoliimidy] //Trudy VIAM. 2013. №11. St. 01 (viam-works.ru).
16. Stoljankov Ju.V., Bejder Je.Ja., Platonov M.M., Petrova G.N. Ustrojstvo dlja mehanicheskoy obrabotki vspenennyh polimernyh materialov [The device for machining of frothed polymeric materials] //Trudy VIAM. 2015 (v pečati).
17. Ustrojstvo dlja mehanicheskoy obrabotki vspenennyh polimernyh materialov [The device for machining of frothed polymeric materials]: pat. №145916. Ros. Federacija; opubl. 27.09.2014.