

Научная статья

УДК 678.072

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-68-83

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА ТЕРМОСТОЙКИХ ПОЛИИМИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.Л. Шошева¹, А.Ю. Копнов¹, М.А. Лаврин¹, А.А. Митрошина¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Представлен обзор научно-технической информации, посвященный полиимидным материалам серии LaRC. Раскрыты наиболее значимые физико- и термомеханические свойства термостойких полиимидных полимерных матриц, включая термостойкость, механическую прочность и устойчивость к агрессивным средам. Выделены основные преимущества полиимидов. Описаны химические составы полиимидных материалов серии LaRC и их структурные формулы. Отмечены перспективные направления применения полиимидных материалов в аэрокосмической отрасли.

Ключевые слова: термостойкие полиимиды, полиимидные связующие, PMR-15, термоокислительная стабильность, полиимидные пленки, пенополиимиды

Для цитирования: Шошева А.Л., Копнов А.Ю., Лаврин М.А., Митрошина А.А. Синтез и свойства термостойких полиимидных материалов // Труды ВИАМ. 2025. № 10 (152). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-68-83.

Scientific article

SYNTHESIS AND PROPERTIES OF THERMOSETTING POLYIMIDE MATERIALS

A.L. Shosheva¹, A.Yu. Kopnov¹, M.A. Lavrin¹, A.A. Mitroshina¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The paper presents a review of scientific and technical information on LaRC-series polyimide materials. The most significant physical and thermomechanical properties of heat-resistant polyimide polymer matrices are outlined, including thermal stability, mechanical strength, and resistance to aggressive environments. The main advantages of these polyimides are highlighted. The chemical compositions of LaRC-series polyimide materials and their structural formulas are described. Promising application areas for polyimide materials in the aerospace industry are discussed.

Keywords: thermosetting polyimide, polyimide resins, PMR-15, thermo-oxidative stability, polyimide films, polyimide foams

For citation: Shosheva A.L., Kopnov A.Yu., Lavrin M.A., Mitroshina A.A. Synthesis and properties of thermosetting polyimide materials. *Trudy VIAM*, 2025, no. 10 (152), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-68-83.

Введение

Одним из основных направлений развития авиационных материалов является расширение применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) в теплонагруженных элементах аэрокосмической техники для повышения их энергоэффективности. Основное значение имеют термостойкие полиимидные связующие, способные сохранять свойства при температурах до 320 °С [1, 2]. Первые промышленные марки полиимидных связующих (Skybond, Pyralin PJ, СП-97) создавали на основе реакции поликонденсации, их основной недостаток – образование дефектов в виде пор, возникающих в результате выделения низкомолекулярных продуктов при отверждении. Решением данной проблемы стали полиимидные связующие типа PMR (polymerization monomer agents – полимеризация мономерных реагентов) [3], разработанные NASA (США), которые отверждаются по полимеризационному механизму без выделения летучих веществ, что повышает прочность и долговечность ПКМ на их основе. Однако состав существующих связующих типа PMR, таких как PMR-15 [4–7], содержит токсичный метанол и имеет ограниченный срок хранения (до 3 недель). Поэтому актуален поиск новых расплавных (безрастворных) полиимидных связующих, сочетающих преимущества PMR-технологии с улучшенной технологичностью, увеличенным сроком хранения и возможностью применения современных методов переработки при сохранении высокой термостойкости и прочностных свойств.

Так, исследовательским центром LaRC (Langley Research Center) при NASA разработаны полиимиды серии LaRC, которые нашли широкое применение в аэрокосмической и других высокотехнологичных отраслях [8]. Эти материалы выдерживают экстремальные условия, такие как высокие температуры, ультрафиолетовое излучение и агрессивные химические среды. Основное преимущество полиимидов серии LaRC заключается в уникальном сочетании свойств: высокая температура стеклования, превышающая 250 °С; повышенная термоокислительная стабильность; механическая прочность; устойчивость к воздействию влаги; низкая диэлектрическая проницаемость и высокая адгезия к различным поверхностям. Благодаря этим характеристикам полиимиды серии LaRC идеально подходят для использования в качестве связующих в ПКМ, армированных углеродными или стеклянными волокнами, а также в качестве высокотемпературных клеев, пленок, пенопластов и радиопрозрачных материалов.

Среди наиболее известных представителей серии LaRC можно выделить такие материалы, как LaRC SI, LaRC RP-46, LaRC RP-50, LaRC PETI-5 и LaRC PETI-330. Эти полиимиды демонстрируют превосходные свойства при использовании в условиях длительного воздействия высоких температур (до 370 °С и более), что делает их незаменимыми для создания теплозащитных систем, конструкционных элементов космических аппаратов и элементов двигателей. Особый интерес представляют специализированные модификации полиимидов LaRC, такие как LaRC CP (цветные полиимиды) и LaRC LCR (жидкокристаллические связующие).

LaRC SI

Термопластичный полиимид LaRC SI синтезируют из таких мономеров, как 3,4-оксидианилин (3,4-ODA), 4,4-оксидифталевый ангидрид (ODPA) и 3,3',4,4'-бифенилтетракарбонный диангидрид (BPDA) [9–11]. На рис. 1 представлена химическая структура полиимида LaRC SI.

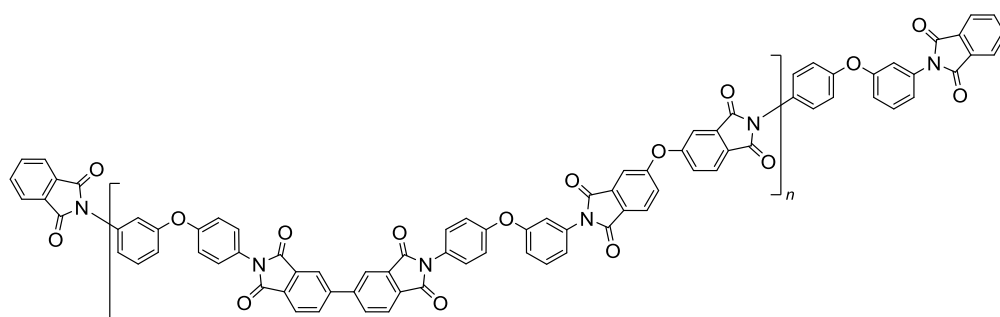


Рис. 1. Химическая структура полиимида LaRC SI

В отличие от основной части ароматических полиимидов, как правило, не растворяющихся в большинстве органических растворителей, полиимид LaRC SI уникален тем, что растворяется в высококипящих полярных органических растворителях, таких как N-метилпирролидон. Кроме того, полиимид LaRC SI отличается гибкостью и устойчивостью к различным агрессивным средам [12] и обладает следующими физико-механическими свойствами:

Диэлектрическая проницаемость при частоте 1 МГц	3,2
Коэффициент рассеяния при частоте 1 МГц	0,002
Огнестойкость по методике UL 94 (Underwriters Laboratories)	VTM-0
Температура стеклования, °С	248–251
Плотность, г/см ³ , при температуре 23 °С	1,376
Твердость	23–27
Коэффициент линейного теплового расширения	
$\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$, при температуре, °С:	
23–150	46
150–200	60

Полиимид LaRC SI используют в качестве высокопрочной тонкой пленки в гибких печатных платах и кабелях, а также в качестве термопластичного клея, так как данные полиимидные пленки могут быть склеены при нагревании и давлении. Полиимид LaRC SI образует высокопрочные клеевые соединения при давлении 0,1 МПа и может использоваться при криогенных и превышающих 177 °С температурах [13]. Альтернативные области применения включают защитные покрытия для электроизоляции с устойчивостью к ультрафиолетовому излучению и радиации. На рис. 2 представлены демонстрационные образцы, изготовленные с использованием полиимида LaRC SI.

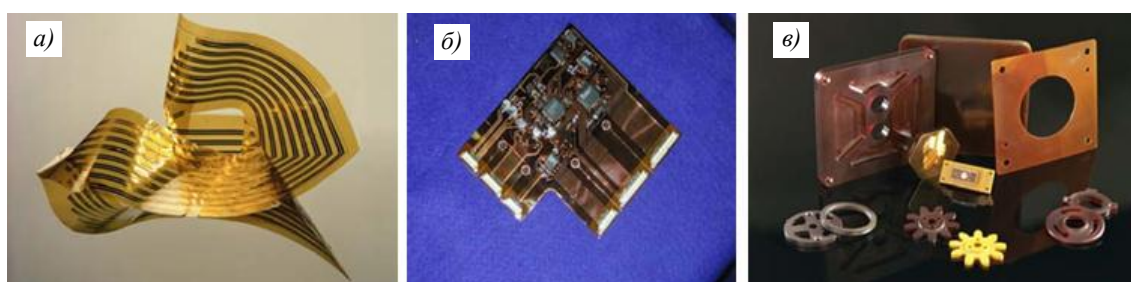


Рис. 2. Гибкий кабель (а), гибкая высокоскоростная многослойная схема аналого-цифрового преобразователя без использования клея (б) и различные детали (в) [14]

LaRC RP46

Термостойкий термореактивный полиимид LaRC RP46 синтезируют из трех мономеров: метилового эфира 5-норборнен-2,3-дикарбоновой кислоты (NE), 3,4-оксиданилина

(3,4-ODA) и диметилового эфира 3,3',4,4'-бензофенонтетракарбоновой кислоты (BTDE) [15]. На рис. 3 представлена химическая структура полиимида LaRC RP46.

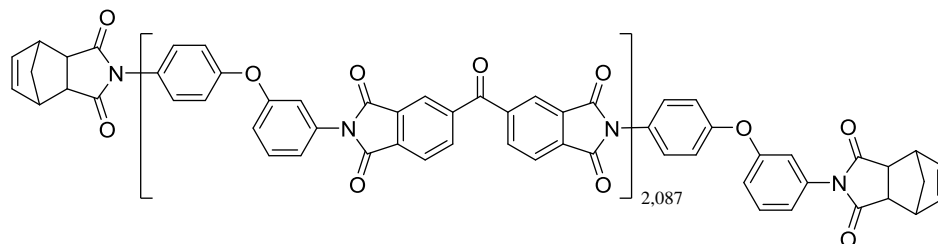


Рис. 3. Химическая структура полиимида LaRC RP46

Особенность полиимида LaRC RP46 заключается в отверждении по цепному механизму без выделения низкомолекулярных веществ. Связующее LaRC RP46 является аналогом полиимида PMR-15, где вместо 4,4'-диаминодифенилметана (MDA) используется 3,4-оксидианилин (3,4-ODA) в связи с предполагаемым канцерогенным действием MDA.

Связующее LaRC RP46 обладает высокой термоокислительной стабильностью и сохраняет прочность при повышенных температурах. Материалы на основе связующего LaRC RP46 и армирующих волокон (углеродные, стеклянные и др.) имеют рабочую температуру от -100 до $+371$ °С (температура стеклования составляет 392 °С) и могут выдерживать нагрев до температуры $+816$ °С в течение нескольких секунд, не поддерживая горение [16]. Помимо исключительной термостойкости, полиимид LaRC RP46 обладает превосходной химической, влаго- и коррозионной стойкостью. Он имеет низкие значения диэлектрической проницаемости (2,9 при частоте 10 ГГц) и коэффициента линейного теплового расширения, что позволяет использовать его при изготовлении печатных плат и микросхем [17]. Полиимид LaRC RP46 также находит применение в производстве деталей авиационных двигателей, космических аппаратов, корпусов малых спутников, элементов ракет, где критически важно сочетание легкости и прочности. Кроме того, его долговечность в экстремально агрессивных условиях существенно снижает затраты на обслуживание [18].

Полиимид LaRC RP46 можно использовать в качестве формовочной смеси для литья под давлением, клея, покрытия, связующего, пены или пленки. Материалы на основе полиимидного связующего LaRC RP46 применяются в качестве теплозащитных покрытий, где необходимы легкость, прочность и термостойкость, а также в носовых обтекателях ракет, где, помимо легкости и термостойкости, ценятся диэлектрические и изоляционные свойства. На рис. 4 представлены материалы на основе полиимида LaRC RP46 и его огнестойкость.

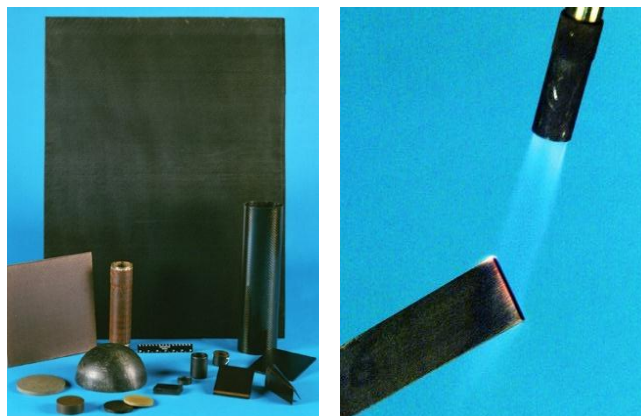


Рис. 4. Материалы на основе полиимида LaRC RP46 и его огнестойкость [19]

LaRC RP50

Термостойкий терморезистивный полиимид LaRC RP50 синтезируют из трех мономеров: ангидрида 5-норборнен-2,3-дикарбоновой кислоты (NA), 3,4-оксиданилина (3,4-ODA) и 3,3',4,4'-бензофенонтетракарбонового диангидрида (BTDA) [20]. На рис. 5 представлена химическая структура полиимида LaRC RP50.

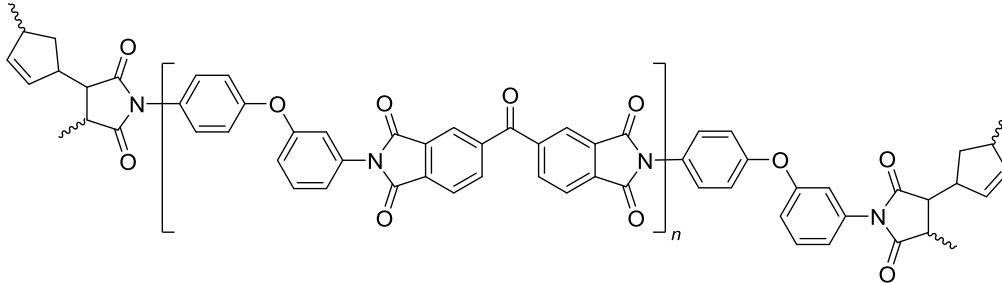


Рис. 5. Химическая структура полиимида LaRC RP50

Полиимиды LaRC RP50 и LaRC RP46 имеют схожие химическую формулу и свойства. В отличие от полиимида LaRC RP46, который преимущественно применяется в виде связующего, полиимид LaRC RP50 чаще используется в качестве покрытий, термостойкого клея и прочных тонкопленочных материалов. Диапазон рабочей температуры полиимида LaRC RP50 находится в пределах от -100 до $+371$ °C и кратковременно – до $+850$ °C. Данный полиимид имеет низкие значения диэлектрической проницаемости (2,9 при частоте 10 ГГц) и коэффициента рассеяния (0,001 при частоте 10 ГГц) [21].

LaRC PETI-5

Синтез термостойкого полиимида LaRC PETI-5 осуществляется из таких мономеров, как 4-фенилэтинилфталеый ангидрид (PEPA) в качестве концевой группы, 3,3',4,4'-бифенилтетракарбоновый диангидрид (BPDA), 3,4-оксиданилин (3,4-ODA) и 1,3-бис(3-аминофенокси)бензол (1,3-bis(3-APB)) [22, 23]. На рис. 6 представлена химическая структура полиимида LaRC PETI-5 с молекулярной массой ~ 5000 г/моль.

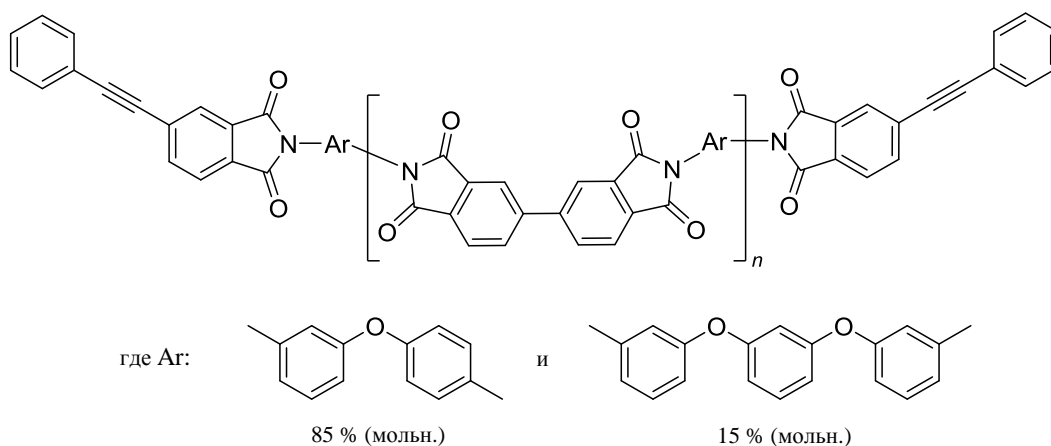


Рис. 6. Химическая структура полиимида LaRC PETI-5

Полиимид LaRC PETI-5 выбран для программы NASA по созданию сверхзвукового пассажирского самолета благодаря сочетанию свойств, критически важных для

экстремальных условий полетов [24, 25]. Его рабочая температура варьируется от -200 до $+370$ °C [26], а термоокислительная стабильность сохраняется даже при нагреве до температуры 300 °C в течение 1000 ч [27]. Ключевая особенность химической структуры полиимида LaRC PETI-5 – наличие концевых фенилэтильных групп, которые обеспечивают низкую вязкость расплава до отверждения, упрощая формование и переработку [28]. После отверждения при температуре 250 – 300 °C под давлением образуется плотно сшитая полимерная матрица, устойчивая к деформациям и термической деградации. На рис. 7 представлена термическая стабильность полиимида LaRC PETI-5, отвержденного при температурах 220 , 300 , 350 и 400 °C.

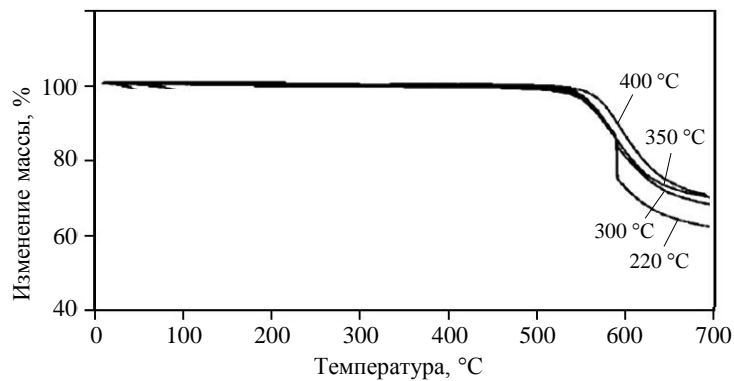


Рис. 7. Термическая стабильность полиимида LaRC PETI-5, отвержденного при различных температурах

Полиимид PETI-5 обладает более низкой вязкостью расплава по сравнению с полиимидом LaRC RP46 при аналогичной термостойкости и механической прочности, что упрощает производство крупногабаритных деталей (рис. 8). Благодаря этим свойствам полиимид LaRC PETI-5 может применяться в аэрокосмической промышленности для создания деталей двигателей, теплозащитных панелей и элементов конструкций, работающих в экстремальных условиях [29].



Рис. 8. Струнгерная панель из полимерных композиционных материалов на основе полиимидного связующего LaRC PETI-5 и углеродного волокна IM7 [30]

LaRC PETI-330

Полиимидное связующее LaRC PETI-330 используется для таких методов переработки, как вакуумная инфузия, технология пропитки под давлением (Resin Transfer Molding – RTM) и ее производная (Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding – VaRTM) [31]. Полиимид LaRC PETI-330 обладает не только низкой вязкостью расплава, но и стабильностью, что позволяет хорошо пропитывать ткань при низком давлении

и высоких температурах [32]. Эти особенности объясняются химической структурой полиимида, представленной на рис. 9. Полиимид LaRC PETI-330 синтезируют из 2,3,3,4-бифенильного тетракарбоксилатного ангидрида (a-BPDA), смеси двух ароматических диаминов, а именно 1,3-бис(4-аминофенокси)бензола (1,3-bis(4-APB)) и 1,3-диаминобензола (m-PDA), а также 4-фенилэтинилфталевого ангидрида (PEPA) в качестве концевой группы.

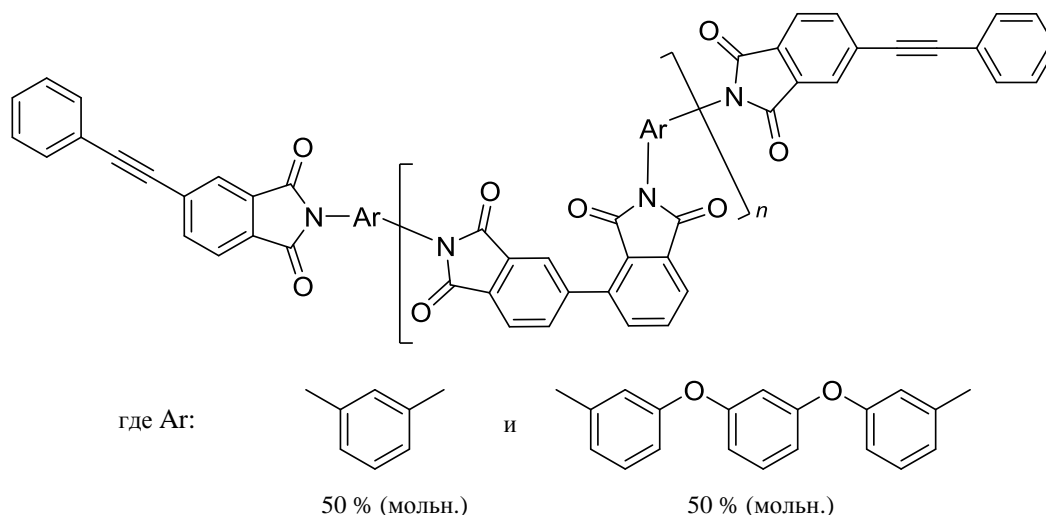


Рис. 9. Химическая структура полиимида LaRC PETI-330

Полиимид LaRC PETI-330 имеет температуру стеклования 330 °С и рабочую температуру 288 °С [33]. В табл. 1 представлены механические свойства углепластиков на основе полиимидного связующего LaRC PETI-330.

Таблица 1

Механические свойства углепластиков на основе связующего LaRC PETI-330

Свойства	Температура испытания, °С	Значения свойств для углепластиков	
		PETI-330/AS4 8HS	PETI-330/T650 8HS
Предел прочности при сжатии с открытым отверстием, МПа	23	250	270
	288	218	200
Модуль упругости при сжатии с открытым отверстием, ГПа	23	42	47
	288	40	44
Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа	23	38	56
	232	37	43
	288	34	35

Полиимид LaRC PETI-330 обладает высокой термостойкостью, как и полиимид LaRC PETI-5. Образцы углепластика на основе полиимидного связующего PETI-330/IM7 демонстрируют высокий уровень сохранения предела прочности при изгибе в условиях повышенных температур: 78 % – при 177 °С, 61 % – при 288 °С (рис. 10).

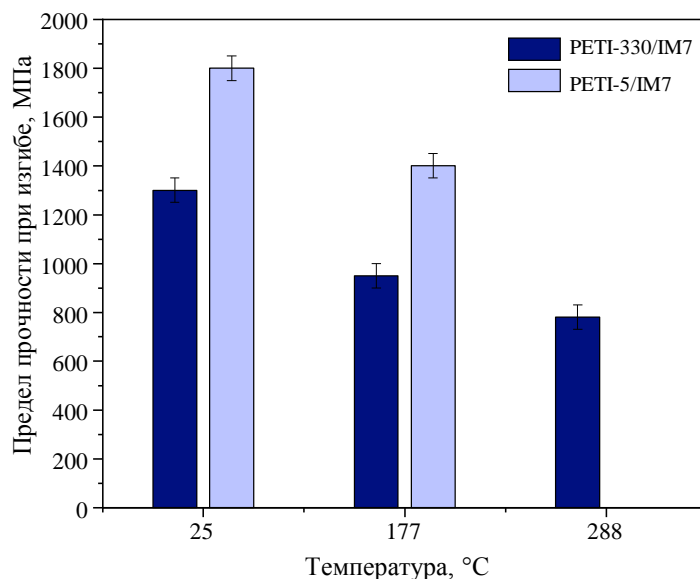


Рис. 10. Предел прочности при изгибе углепластика на основе полиимидов LaRC PETI-330/IM7 и LaRC PETI-5/IM7 при различных температурах

LaRC TEEK

Термостойкий пенополиимид LaRC TEEK сочетает уникальные свойства полиимидов с преимуществами пеноматериалов [34, 35]. На рис. 11 представлены химические структуры пенополиимидов серии LaRC TEEK.

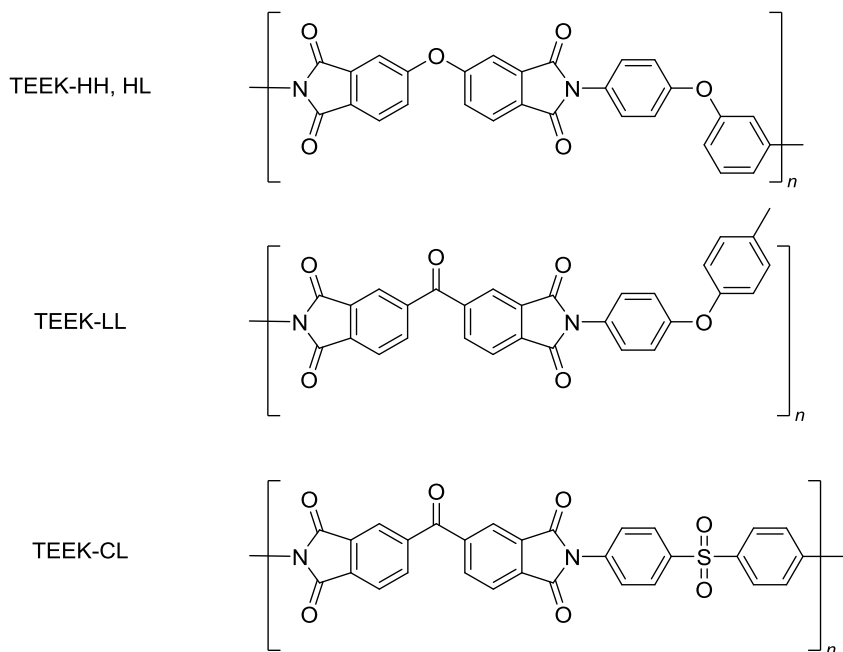


Рис. 11. Химические структуры полиимидов серии LaRC TEEK

Плотность пенополиимидов серии LaRC TEEK варьируется от 0,08 до >0,32 г/см³, а температура стеклования – от 237 до 321 °С [36]. Пенополиимиды этой серии обладают такими свойствами, как огнестойкость, гидролитическая стабильность, высокая прочность при сжатии [37]. В табл. 2 приведены термические и физико-механические свойства пенополиимидов LaRC TEEK [38–40].

Термические и физико-механические свойства пенополиимидов LaRC TEEK

Свойства	Значения свойств для пенополиимидов			
	LaRC TEEK-HH	LaRC TEEK-HL	LaRC TEEK-LL	LaRC TEEK-CL
Плотность, г/см ³	0,080	0,032		
Кислородный индекс, %	51	42	49	46
Температура стеклования, °С	273		300	321
Теплопроводность, Вт/(м·К), при температуре 204 °С	0,031	0,029	0,044	0,03
Предел прочности при сжатии, МПа, при температуре, °С:	25	0,84	0,30	0,10
	177	0,31	0,07	–

Пенополиимиды серии LaRC TEEK могут использоваться в различных областях авиационной техники в качестве заполнителей трехслойных конструкций, а также для изготовления конструкций теплоизоляционного назначения [41].

LaRC CP

Химическая структура полиимида LaRC CP-2 представлена на рис. 12 [42–45]. Главная особенность полиимидов LaRC CP заключается в уникальной прозрачности, которая отсутствует у традиционных ароматических полиимидов, имеющих желтоватый или янтарный оттенок.

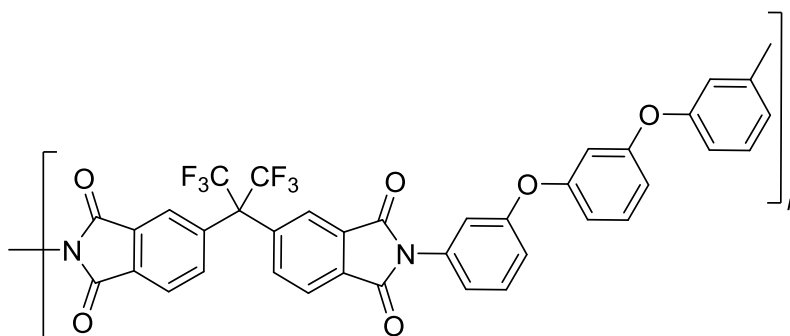


Рис. 12. Химическая структура полиимида LaRC CP-2

Для достижения прозрачности в структуре полиимидов LaRC CP вместо полностью ароматических компонентов используются циклоалифатические мономеры или фторированные группы. Таким образом снижается электронная плотность в полимерной цепи, что минимизирует поглощение света в видимом диапазоне при сохранении ключевого свойства полиимидов – термостойкости (до 300–400 °С) и механической прочности. Тонкие пленки, изготовленные из этих полиимидов, обладают оптической прозрачностью и высокой стойкостью к воздействию ультрафиолетового излучения в космосе, а также отличной термической стабильностью при высоких температурах.

Полиимиды серии LaRC CP находят применение в аэрокосмической отрасли [46, 47]. Кроме того, сочетание низкой диэлектрической проницаемости (2,5 при частоте 1 кГц), влагостойкости, растворимости в различных органических растворителях и высокой термической стабильности обеспечивает значительные преимущества для использования в микроэлектронике, жидкокристаллических дисплеях и антеннах для связи [48].

LaRC LCR

Ароматическое термореактивное жидкокристаллическое связующее LaRC LCR [49] используется для изготовления ПКМ методом пултрузии, пропитки под давлением (RTM), пропитки пленочными связующими (Resin Film Infusion – RFI) и обладает такими свойствами, как высокая термическая стабильность и хорошая адгезия [50]. Как показано на рис. 13, химическая структура полиимида LaRC LCR включает полимерный каркас из 4-гидроксибензойной кислоты (HBA)/6-гидрокси-2-нафтенной кислоты (HNA) (I) и фенилэтинильную группу в качестве конечного участка (II).

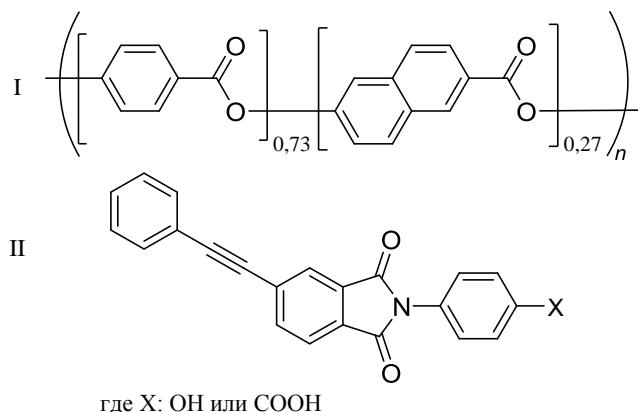


Рис. 13. Химическая структура полиимида LaRC LCR: I – основной фрагмент полимерной цепи, II – конечная группа

Таблица 3

Термомеханические свойства полиимидов LaRC LCR и LaRC PETI-5

Свойства	Значения свойств для полиимидов	
	LaRC PETI-5	LaRC LCR
Температура стеклования, °С	255	210
Коэффициент линейного теплового расширения $\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$	40,35	71,09
Предел прочности при сжатии, МПа, при температуре, °С:		
	25	0,84
177	0,31	0,08

Предполагалось, что полимерная цепь жидкокристаллического связующего LaRC LCR представляет собой жесткую стержнеобразную высокоориентированную структуру и способна обеспечить дополнительную прочность и жесткость материала в выровненном направлении для применения в криогенных условиях. Однако согласно данным табл. 3, криогенные температуры вызвали эффект охрупчивания в отвержденных связующих LaRC PETI-5 и LaRC LCR. Можно сделать вывод, что данные полиимиды не подходят для применения в криогенных топливных баках из-за хрупкости и неспособности накапливать энергию для предотвращения роста трещин.

Заключения

С 1970-х гг. ученые исследовательского центра LaRC при NASA активно разрабатывали новые термостойкие материалы. Описаны особенности химического строения, физико-химические и термомеханические свойства полиимидов LaRC. Данные полиимиды могут использоваться в качестве связующих для получения ПКМ, а также

в виде высокотемпературных клеев, защитных покрытий и тонких пленок. Однако переработка некоторых полиимидных материалов предполагает высокотемпературное отверждение при 300–350 °С, благодаря чему формируется сшитая полимерная матрица, ответственная за долговечность материала. Отверждение при высокой температуре требует применения специализированного оборудования, что увеличивает стоимость использования полиимидов по сравнению с аналогами и ограничивает их массовое применение.

Термопластичный полиимид LaRC SI применяется в производстве гибких печатных плат и кабелей благодаря способности формировать тонкие прочные пленки и покрытия, устойчивые к воздействию агрессивных сред. Термореактивные полиимиды LaRC RP46 и RP50 используются в деталях авиационных двигателей, корпусах спутников и теплозащитных панелях. Полиимид LaRC RP50 чаще применяется в виде термостойких покрытий, а полиимид LaRC RP46 – в качестве полиимидного связующего в ПКМ. Для элементов, требующих сложного формования, разработаны полиимиды LaRC PETI-5 и LaRC PETI-330. Полиимид LaRC PETI-5 включает фенилэтинильные концевые группы, которые обеспечивают низкую вязкость расплава, что упрощает создание крупногабаритных деталей, таких как теплозащитные панели сверхзвуковых самолетов или элементы космических аппаратов. Благодаря теплоизоляционным характеристикам пенополиимиды серии LaRC TEEK активно применяются в авиационной отрасли. Их используют как наполнители в трехслойных сэндвич-панелях для обшивки самолетов, снижая массу конструкции без потери прочности. Бесцветные полиимиды LaRC CP, обладающие оптической прозрачностью и устойчивостью к ультрафиолетовому излучению, востребованы в микроэлектронике: они служат защитными покрытиями для гибких дисплеев, светодиодов и антенн спутников связи, где сочетание низкой диэлектрической проницаемости и термостойкости исключает деградацию в космической среде. Несмотря на такие ограничения, как хрупкость при криогенных температурах, полиимид LaRC LCR используется в ПКМ для специализированных применений, где важна пространственная ориентация молекул. Полиимиды серии LaRC нашли применение в отраслях, где важны термическая и химическая стойкость, механическая прочность.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Список источников

1. Давыдова И.Ф., Каблов Е.Н., Кавун Н.С. Термостойкие негорючие полиимидные стеклотекстолиты для изделий авиационной и ракетной техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2009. № 7. С. 2–11.
2. Scola D. Polyimide Resins // ASM Handbook. ASM International, 2001. Vol. 21: Composites. P. 105–119.
3. Михайлин Ю.А. Технологические и эксплуатационные характеристики полиимидных связующих, препрегов и имидопластов типа PMR (обзор) // Пластические массы. 1984. № 3. С. 17–23.
4. Ахмадиева К.Р., Петрова А.П., Шошева А.Л., Боков В.В. Теплостойкий полиимидный клей конструкционного назначения // Труды ВИАМ. 2023. № 6 (124). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.01.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-15-24.
5. Жаринов М.А., Шимкин А.А., Ахмадиева К.Р., Зеленина И.В. Особенности и свойства расплавленного полиимидного связующего полимеризационного типа // Труды ВИАМ. 2018. № 12 (72). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.01.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-46-53.

6. Валуева М.И., Зеленина И.В., Начаркина А.В., Сидорина А.И., Славин А.В. Высокотемпературные углепластики на основе полиимидных связующих // Труды ВИАМ. 2024. № 11 (141). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.01.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-71-88.
7. Зеленина И.В., Валуева М.И., Начаркина А.В., Куршев Е.В. Структура и свойства высокотемпературного углепластика на основе полиимидного связующего // Труды ВИАМ. 2023. № 3 (121). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.01.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-13-28.
8. Pater R.H., Curto P.A. Advanced materials for space applications // Acta Astronautica. 2007. Vol. 61. No. 11–12. P. 1121–1129.
9. Process for preparing a tough, soluble, aromatic, thermoplastic copolyimide: pat. US5639850A; appl. 18.05.95; publ. 17.06.97.
10. Whitley K.S. Mechanical Properties of LaRC TM SI Polymer for a Range of Molecular Weights // NASA technical memorandum. Hampton, 2000. P. 5–32.
11. Tough, soluble, aromatic, thermoplastic copolyimides: pat. US5741883A; appl. 16.12.94; publ. 21.04.98.
12. Holloway N.M., Barnes K.N., Draughon G.K., Scott L.A. Fabrication of adhesiveless lightweight flexible circuits using Langley Research Center soluble-imide «LaRC-SI» polyimide film // SPIE. San Diego, 2002. P. 293–303.
13. Sang Q. Preparation and etching of LaRC-SI polyimide film. Louisville: University of Louisville, 1999. P. 1073.
14. Bryant R.G. Moving Technology from Test Tube to Commercial Product: A Case Study of Three Inventions // Recent Progress in Space Technology. 2014. Vol. 4. No. 1. P. 38.
15. Low Toxicity High Temperature PMR Polyimides: pat. US5171822A; appl. 05.02.1991; publ. 15.12.1992.
16. Hou T.H., Wilkinson S.P., Johnston N.J. et al. Processing and properties of IM7/LARC-RP46 polyimide composites // 39th International SAMPE Symposium and Exhibition. Anaheim, California, 1994. P. 1–14.
17. Hutapea P., Yuan F. The effect of thermal aging on the Mode-I interlaminar fracture behavior of a high-temperature IM7/LARC-RP46 composite // Composites science and technology. 1999. Vol. 59. No. 8. P. 1271–1286.
18. Simone C.D., Xiao Y., Sun X., Scola D. Some aspects of the cure of RP-46, a nadic end-capped polyimide, and phenyl nadimide and bis-nadic-3,4'-ODA model compounds // High Performance Polymers. 2005. Vol. 17. No. 1. P. 51–72.
19. Pater R.H. Polyimide Resins Resist Extreme Temperatures // Spinoff NASA Contribution. Virginia, 2009. P. 57.
20. Heat, moisture, and chemical resistant polyimide compositions and methods for making and using them: pat. US6777525B2; appl. 01.04.02; publ. 17.08.04.
21. Hawkins B.P., Hinkley J.A., Pater R.H., Moore J. Stretch-orientation of LaRC™ RP50 polyimide film // High Performance Polymers. 2006. Vol. 18. No. 4. P. 469–478.
22. Imide oligomers endcapped with phenylethynyl phthalic anhydrides and polymers therefrom: pat. US5567800A; appl. 28.10.94; publ. 22.10.96.
23. Phenylethynyl terminated imide oligomers: pat. US5412066A; appl. 03.04.94; publ. 02.05.95.
24. Fang X., Scola D.A. Investigation of microwave energy to cure carbon fiber reinforced phenylethynyl-terminated polyimide composites, PETI-5/IM7 // Journal of Polymer Science. Part A: Polymer Chemistry. 1999. Vol. 37. No. 24. P. 4616–4628.
25. Thompson C., Connell J., Hergenrother P. Adhesive and composite properties of a new phenylethynyl terminated imide // 47th International SAMPE Symposium and Exhibition. Hampton, 2002. P. 1–13.
26. Ghose S., Watson K.A., Cano R.J. et al. High temperature VARTM of phenylethynyl terminated imides // High Performance Polymers. 2009. Vol. 21. No. 5. P. 653–672.
27. Cho D., Drzal L.T. Characterization, properties, and processing of LaRC PETI-5 as a high-temperature sizing material. II. Thermal characterization // Journal of Applied Polymer Science. 2000. Vol. 75. No. 10. P. 190–199.

28. Гавриш А.В., Ахмадиева К.Р., Шошева А.Л., Лаврин М.А. Термореактивные ароматические олигоими́ды с фенилэтинильными реакционноспособными группами // Труды ВИАМ. 2023. № 9 (127). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.01.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-41-56.
29. Cho D., Choi Y., Drzal L.T. Characterization, properties, and processing of LaRC PETI-5® as a high-temperature sizing material: III. Adhesion enhancement of carbon/BMI composites // The Journal of Adhesion. 2003. Vol. 79. No. 1. P. 1–22.
30. Tenney D.R., Davis J.G., Pipes R.B., Johnston N. NASA Composite Materials Development: Lessons Learned and Future Challenges // Materials Science and Engineering: A. 2009. No. 1. P. 25–26.
31. Composition of and method for making high performance resins for infusion and transfer molding processes: pat. US6359107B1; appl. 18.05.00; publ. 19.03.02.
32. Cano R.J., Ghose S., Watson K.A. et al. Processing and Properties of Vacuum Assisted Resin Transfer Molded Phenylethynyl Terminated Imide Composites // SAMPE. Baltimore, 2002. Art. NF1676L-13433.
33. Ghose S., Cano R.J., Britton S.M. et al. Phenylethynyl Terminated Imide (PETI) Composites Made by High Temperature VARTM // The 14th European conference on composite materials. Budapest, 2010. P. 1–10.
34. Williams M.K., Melendez O., Palou J. et al. Characterization of polyimide foams after exposure to extreme weathering conditions // Journal of adhesion science and technology. 2004. Vol. 18. No. 5. P. 561–573.
35. Williams M.K., Nelson G.L., Brenner J.R. et al. High performance polyimide foams // ACS Symposium Series. Washington, DC: American Chemical Society, 2001. P. 49–62.
36. Aromatic polyimide foam: pat. US6133330A; appl. 21.05.99; publ. 17.10.00.
37. Hou T.-H., Weiser E.S., Siochi E.J., St. Clair T.L. Processing characteristics of TEEK polyimide foam // High Performance Polymers. 2004. Vol. 16. No. 4. P. 487–504.
38. Kuwabara A., Ozasa M., Shimokawa T. et al. Basic mechanical properties of balloon-type TEEK-L polyimide-foam and TEEK-L filled aramid-honeycomb core materials for sandwich structures // Advanced composite materials. 2005. Vol. 14. No. 4. P. 343–363.
39. Williams M.K., Weiser E.S., Fesmire J.E. et al. Effects of cell structure and density on the properties of high performance polyimide foams // Polymers for Advanced Technologies. 2005. Vol. 16. No. 2–3. P. 167–174.
40. Weiser E.S., Johnson T.F., St. Clair T.L. et al. Polyimide foams for aerospace vehicles // High Performance Polymers. 2000. Vol. 12. No. 1. P. 1–12.
41. Каблов Е.Н., Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н., Столянков Ю.В., Румянцева Т.В. Пенополиими́ды // Труды ВИАМ. 2015. № 4. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.01.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-9-9.
42. Structures from low dielectric polyimides: pat. US5338826A; appl. 28.09.92; publ. 16.08.94.
43. Process for preparing essentially colorless polyimide film containing phenoxy-linked diamines: pat. US4595548A; appl. 23.08.84; publ. 17.06.86.
44. Thompson C.M., Herring H.M., Gates T.S., Connell J.W. Preparation and characterization of metal oxide/polyimide nanocomposites // Composites science and technology. 2003. Vol. 63. No. 11. P. 1591–1598.
45. Wooldridge E.M., Powers C.E. Evaluation of thin films for the Next-Generation Space Telescope (NGST) sunshield // Space Telescopes and Instruments. Kona, Hawaii, 1998. P. 134–140.
46. Woo B., Ertmer K.M., Coverstone V.L. et al. Deployment experiment for ultralarge solar sail system (ultrasail) // Journal of Spacecraft and Rockets. 2011. Vol. 48. No. 5. P. 874–880.
47. Reed K., Willenberg H.J. Early commercial demonstration of space solar power using ultralightweight arrays // Acta Astronautica. 2009. Vol. 65. No. 9–10. P. 1250–1260.
48. Nazarenko V., St. Clair A., Klouda R. et al. Chemically imidized polyimide as an alignment material for liquid crystal displays // SID Symposium Digest of Technical Papers. Wiley, 1998. P. 135–138.

49. Dingemans T.J., van der Zwaag S., Knijnenberg A. et al. Novel liquid crystal thermoset resins for cryogenic fuel tank applications // The 24th International Congress of the Aeronautical Sciences. Yokohama, 2004. P. 1–4.
50. Pavlick M., Johnson W., Jensen B., Weiser E. Evaluation of mechanical properties of advanced polymers for composite cryotank applications // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. 2009. Vol. 40. No. 4. P. 359–367.

References

1. Davydova I.F., Kablov E.N., Kavun N.S. Heat-resistant non-flammable polyimide glass-fiber laminates for aviation and rocket technology products. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2009, no. 7, pp. 2–11.
2. Scola D. Polyimide Resins. *ASM Handbook*. ASM International, 2001, vol. 21: Composites, pp. 105–119.
3. Mikhailin Yu.A. Technological and operational characteristics of polyimide binders, prepregs and imidoplastics of the PMR type (review). *Plasticheskie massy*, 1984, no. 3, pp. 17–23.
4. Akhmadieva K.R., Petrova A.P., Shosheva A.L., Bokov V.V. Heat-resistant polyimide adhesive of constructive purposes. *Trudy VIAM*, 2023, no. 6 (124), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 15, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-15-24.
5. Zharinov M.A., Shimkin A.A., Akhmadiyeva K.R., Zelenina I.V. Features and properties of solvent-free PMR-type polyimide resin. *Trudy VIAM*, 2018, no. 12 (72), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 14, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-46-53.
6. Valueva M.I., Zelenina I.V., Nacharkina A.V., Sidorina A.I., Slavin A.V. High-temperature carbon fiber reinforced plastics based on polyimide binders. *Trudy VIAM*, 2024, no. 11 (141), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 13, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-71-88.
7. Zelenina I.V., Valueva M.I., Nacharkina A.V., Kurshev E.V. Structure and properties of high-temperature carbon fiber reinforced plastic based on polyimide binder. *Trudy VIAM*, 2023, no. 3 (121), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 17, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-13-28.
8. Pater R.H., Curto P.A. Advanced materials for space applications. *Acta Astronautica*, 2007, vol. 61, no. 11–12, pp. 1121–1129.
9. *Process for preparing a tough, soluble, aromatic, thermoplastic copolyimide*: pat. US5639850A; appl. 18.05.95; publ. 17.06.97.
10. Whitley K.S. Mechanical Properties of LaRC TM SI Polymer for a Range of Molecular Weights. *NASA technical memorandum*. Hampton, 2000, pp. 5–32.
11. *Tough, soluble, aromatic, thermoplastic copolyimides*: pat. US5741883A; appl. 16.12.94; publ. 21.04.98.
12. Holloway N.M., Barnes K.N., Draughon G.K., Scott L.A. Fabrication of adhesiveless lightweight flexible circuits using Langley Research Center soluble-imide «LaRC-SI» polyimide film. *SPIE*. San Diego, 2002, pp. 293–303.
13. Sang Q. *Preparation and etching of LaRC-SI polyimide film*. Louisville: University of Louisville, 1999, p. 1073.
14. Bryant R.G. Moving Technology from Test Tube to Commercial Product: A Case Study of Three Inventions. *Recent Progress in Space Technology*, 2014, vol. 4, no. 1, p. 38.
15. *Low Toxicity High Temperature PMR Polyimides*: pat. US5171822A; appl. 05.02.91; publ. 15.12.92.
16. Hou T.H., Wilkinson S.P., Johnston N.J. et al. Processing and properties of IM7/LARC-RP46 polyimide composites. *39th International SAMPE Symposium and Exhibition*. Anaheim, California, 1994, pp. 1–14.
17. Hutapea P., Yuan F. The effect of thermal aging on the Mode-I interlaminar fracture behavior of a high-temperature IM7/LARC-RP46 composite. *Composites science and technology*, 1999, vol. 59, no. 8, pp. 1271–1286.

18. Simone C.D., Xiao Y., Sun X., Scola D. Some aspects of the cure of RP-46, a nadic end-capped polyimide, and phenyl nadimide and bis-nadic-3,4'-ODA model compounds. *High Performance Polymers*, 2005, vol. 17, no. 1, pp. 51–72.
19. Pater R.H. Polyimide Resins Resist Extreme Temperatures. *Spinoff NASA Contribution*. Virginia, 2009, p. 57.
20. *Heat, moisture, and chemical resistant polyimide compositions and methods for making and using them*: pat. US6777525B2; appl. 01.04.02; publ. 17.08.04.
21. Hawkins B.P., Hinkley J.A., Pater R.H., Moore J. Stretch-orientation of LaRC™ RP50 polyimide film. *High Performance Polymers*, 2006, vol. 18, no. 4, pp. 469–478.
22. *Imide oligomers endcapped with phenylethynyl phthalic anhydrides and polymers therefrom*: pat. US5567800A; appl. 28.10.94; publ. 22.10.96.
23. *Phenylethynyl terminated imide oligomers*: pat. US5412066A; appl. 03.04.94; publ. 02.05.95.
24. Fang X., Scola D.A. Investigation of microwave energy to cure carbon fiber reinforced phenylethynyl-terminated polyimide composites, PETI-5/IM7. *Journal of Polymer Science. Part A: Polymer Chemistry*, 1999, vol. 37, no. 24, pp. 4616–4628.
25. Thompson C., Connell J., Hergenrother P. Adhesive and composite properties of a new phenylethynyl terminated imide. *47th International SAMPE Symposium and Exhibition*. Hampton, 2002, pp. 1–13.
26. Ghose S., Watson K.A., Cano R.J. et al. High temperature VARTM of phenylethynyl terminated imides. *High Performance Polymers*, 2009, vol. 21, no. 5, pp. 653–672.
27. Cho D., Drzal L.T. Characterization, properties, and processing of LaRC PETI-5 as a high-temperature sizing material. II. Thermal characterization. *Journal of Applied Polymer Science*, 2000, vol. 75, no. 10, pp. 190–199.
28. Gavriš A.V., Akhmadieva K.R., Shosheva A.L., Lavrin M.A. Thermosetting oligoimides with phenylethynyl reactive groups. *Trudy VIAM*, 2023, no. 9 (127), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 22, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-41-56.
29. Cho D., Choi Y., Drzal L.T. Characterization, properties, and processing of LaRC PETI-5® as a high-temperature sizing material: III. Adhesion enhancement of carbon/BMI composites. *The Journal of Adhesion*, 2003, vol. 79, no. 1, pp. 1–22.
30. Tenney D.R., Davis J.G., Pipes R.B., Johnston N. NASA Composite Materials Development: Lessons Learned and Future Challenges. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, no. 1, pp. 25–26.
31. *Composition of and method for making high performance resins for infusion and transfer molding processes*: pat. US6359107B1; appl. 18.05.00; publ. 19.03.02.
32. Cano R.J., Ghose S., Watson K.A. et al. Processing and Properties of Vacuum Assisted Resin Transfer Molded Phenylethynyl Terminated Imide Composites. *SAMPE*. Baltimore, 2002, art. NF1676L-13433.
33. Ghose S., Cano R.J., Britton S.M. et al. Phenylethynyl Terminated Imide (PETI) Composites Made by High Temperature VARTM. *The 14th European conference on composite materials*. Budapest, 2010, pp. 1–10.
34. Williams M.K., Melendez O., Palou J. et al. Characterization of polyimide foams after exposure to extreme weathering conditions. *Journal of adhesion science and technology*, 2004, vol. 18, no. 5, pp. 561–573.
35. Williams M.K., Nelson G.L., Brenner J.R. et al. High performance polyimide foams. *ACS Symposium Series*. Washington, DC: American Chemical Society, 2001, pp. 49–62.
36. *Aromatic polyimide foam*: pat. US6133330A; appl. 21.05.99; publ. 17.10.00.
37. Hou T.-H., Weiser E.S., Siochi E.J., St. Clair T.L. Processing characteristics of TEEK polyimide foam. *High Performance Polymers*, 2004, vol. 16, no. 4, pp. 487–504.
38. Kuwabara A., Ozasa M., Shimokawa T. et al. Basic mechanical properties of balloon-type TEEK-L polyimide-foam and TEEK-L filled aramid-honeycomb core materials for sandwich structures. *Advanced composite materials*, 2005, vol. 14, no. 4, pp. 343–363.

39. Williams M.K., Weiser E.S., Fesmire J.E. et al. Effects of cell structure and density on the properties of high performance polyimide foams. *Polymers for Advanced Technologies*, 2005, vol. 16, no. 2–3, pp. 167–174.
40. Weiser E.S., Johnson T.F., St. Clair T.L. et al. Polyimide foams for aerospace vehicles. *High Performance Polymers*, 2000, vol. 12, no. 1, pp. 1–12.
41. Kablov E.N., Bejder E.Ya., Petrova G.N., Stolyankov Yu.V., Rumyantseva T.V. Foamed polyimides. *Trudy VIAM*, 2015, no. 4, paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 22, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-9-9.
42. *Structures from low dielectric polyimides*: pat. US5338826A; appl. 28.09.92; publ. 16.08.94.
43. *Process for preparing essentially colorless polyimide film containing phenoxy-linked diamines*: pat. US4595548A; appl. 23.08.84; publ. 17.06.86.
44. Thompson C.M., Herring H.M., Gates T.S., Connell J.W. Preparation and characterization of metal oxide/polyimide nanocomposites. *Composites science and technology*, 2003, vol. 63, no. 11, pp. 1591–1598.
45. Wooldridge E.M., Powers C.E. Evaluation of thin films for the Next-Generation Space Telescope (NGST) sunshield. *Space Telescopes and Instruments*. Kona, Hawaii, 1998, pp. 134–140.
46. Woo B., Ertmer K.M., Coverstone V.L. et al. Deployment experiment for ultralarge solar sail system (ultrasail). *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2011, vol. 48, no. 5, pp. 874–880.
47. Reed K., Willenberg H.J. Early commercial demonstration of space solar power using ultralightweight arrays. *Acta Astronautica*, 2009, vol. 65, no. 9–10, pp. 1250–1260.
48. Nazarenko V., St. Clair A., Klouda R. et al. Chemically imidized polyimide as an alignment material for liquid crystal displays. *SID Symposium Digest of Technical Papers*. Wiley, 1998, pp. 135–138.
49. Dingemans T.J., van der Zwaag S., Knijnenberg A. et al. Novel liquid crystal thermoset resins for cryogenic fuel tank applications. *The 24th International Congress of the Aeronautical Sciences*. Yokohama, 2004, pp. 1–4.
50. Pavlick M., Johnson W., Jensen B., Weiser E. Evaluation of mechanical properties of advanced polymers for composite cryotank applications. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2009, vol. 40, no. 4, pp. 359–367.

Информация об авторах

Шошева Анфиса Львовна, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Копнов Александр Юрьевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Лаврин Максим Александрович, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Митрошина Арина Андреевна, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Anfisa L. Shosheva, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Aleksander Yu. Kopnov, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Maxim A. Lavrin, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Arina A. Mitroshina, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 06.03.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 10.03.2025.
The article was submitted 06.03.2025; approved and accepted for publication after reviewing 10.03.2025.