

Научная статья

УДК 621.792.053

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-15-24

ТЕПЛОСТОЙКИЙ ПОЛИИМИДНЫЙ КЛЕЙ КОНСТРУКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

К.Р. Ахмадиева¹, А.П. Петрова¹, А.Л. Шошева¹, В.В. Боков¹

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

Аннотация. Рассмотрены основные физико-механические свойства полиимидного пленочного клея марки ВК-103, который представляет собой смесь имидообразующих компонентов, армированную нетканой стекловалью. Исследовано влияние армирующего наполнителя на прочность клеевых соединений при сдвиге. Приведены свойства клея ВК-103 после воздействия различных эксплуатационных факторов и в сравнении с зарубежными аналогами. Клей ВК-103 предназначен для склеивания металлов (стали, титановые сплавы) и многослойных конструкций из ПКМ с температурой эксплуатации до 320 °С.

Ключевые слова: полиимиды, полиимидный клей, теплостойкие клеи, прочность клеевых соединений при сдвиге, термостойкие полимерные композиционные материалы (ПКМ)

Для цитирования: 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-15-24.

Scientific article

HEAT-RESISTANT POLYIMIDE ADHESIVE OF CONSTRUCTIVE PURPOSES

K.R. Akhmadieva¹, A.P. Petrova¹, A.L. Shosheva¹, V.V. Bokov¹

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 main physical and mechanical properties of polyimide adhesive VK-103 are discussed. The film adhesive VK-103 is a mixture of imide-forming components reinforced with non-woven glass veil. The effect of reinforcing filler on the shear strength of adhesive bonds are investigated. The properties of the adhesive VK-103 after exposure to various operational factors and in comparison with existing foreign analogues are given. The adhesive VK-103 is specialized for bonding metals and multilayer structures of PCM with an operating temperature of up to 320 °C.

Keywords: polyimides, polyimide adhesive, heat-resistant adhesives, shear strength of adhesive bonds, high-temperature polymer composite materials (PCM)

For citation: 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>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-6-15-24.

Введение

Непрерывное развитие областей современной техники – в первую очередь авиастроения и ракетостроения – определяет необходимость создания новых термостойких полимерных материалов, в том числе и клеев.

Начиная с середины 1950-х гг. в мире проводятся многочисленные исследования, направленные на создание новых термостойких полимеров. Эти исследования привели к разработке значительного количества элементоорганических соединений и ароматических карбоцепных полимеров, обладающих комплексом ценных свойств, но химия ароматических полимеров – так называемых полигетероариленов, которые содержат различные гетероциклы в основных цепях макромолекул, получила наибольшее развитие [1].

В ряду полигетероариленов широкое промышленное распространение получили полиимиды, разработка и внедрение которых в промышленность позволили решить проблему получения полимерных материалов, способных к длительной эксплуатации при температурах >250 °С.

Уровень прочностных свойств полиимидных полимерных композиционных материалов (ПКМ) меньше, чем у пластиков на основе «традиционных» связующих – эпоксидных, эпоксифенольных и фенолформальдегидных смол. Для переработки полиимидов требуется применение термостойких вспомогательных материалов, а также специального оборудования. В связи с этим использование полиимидов целесообразно в случае повышенных эксплуатационных требований к материалу: рабочие температуры >250 °С и воздействие агрессивных жидкостей, ионизирующего излучения, влажности, циклического термостарения.

Термостойкие полиимидные клеи используются при производстве авиационных двигателей, элементов планера и рулевого управления самолетов, в том числе в сотовых конструкциях, а также в многоразовых разгонных блоках космических ракет [2–4].

Наиболее широкое распространение находят полиимидные клеи на основе форполимеров, циклизированных полиимидов линейного или редкосшитого строения, а также терморепактивных составов с ненасыщенными концевыми группами, способными к дальнейшим химическим реакциям. Активные работы по созданию таких клеев проводят фирмы DuPont, NASA, Renegade Materials Corporation и Cytac Solvay Group. В результате разработана линейка клеев, клеящие соединения на основе которых выдерживают воздействие температур до 340 °С.

Несмотря на значительные успехи, достигнутые за рубежом за последние годы в области создания полиимидных клеев, актуальным является создание отечественных полиимидных клеев с повышенной тепло- и термостойкостью, обеспечивающих высокую прочность соединений в процессе эксплуатации.

С 1950-х гг. в ВИАМ (в настоящее время – НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ) активно развиваются исследования в области термостойких материалов на основе гетероциклических полимеров [5–9]. Полиимидные связующие полимеризационного типа являются одной из перспективных разработок последних лет. Этот класс материалов представляет собой имидообразующую смесь компонентов с реакционноспособными концевыми группами, при отверждении которых образуются полиимиды сетчатого строения.

В 2017 г. в ВИАМ разработано полиимидное связующее полимеризационного типа марки ВС-51 (ТУ 1-595-12-1682–2017), позволяющее получить угле- и стеклопластики с рабочей температурой до 320 °С [10, 11]. Преимуществами полиимидного связующего марки ВС-51 является низкая пористость отвержденных изделий, высокие тепло- и термостойкость, а также механические свойства, сохраняющиеся после длительного воздействия высоких температур.

Для изготовления многослойных конструкций из высокотемпературных ПКМ потребовалась разработка технологичного полиимидного клея, обеспечивающего высокий уровень прочностных свойств при температурах эксплуатации до 320 °С.

В настоящее время разработан и паспортизован полиимидный пленочный клей марки ВК-103 (ТУ 1-595-12-1916–2020), предназначенный для склеивания металлов (стали, титановых сплавов) и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов с температурой эксплуатации до 320 °С. Пленочный клей марки ВК-103 представляет собой смесь имидообразующих компонентов, армированную нетканой стекловальюю.

В данной статье приводятся основные технологические и физико-механические свойства клея ВК-103, в том числе в сравнении с зарубежными аналогами, а также значения механических свойств после воздействия различных эксплуатационных факторов.

Материалы и методы

Объектом исследования является полиимидный пленочный клей марки ВК-103 (ТУ 1-595-12-1916–2020), разработанный в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Исходными компонентами для получения полиимидного клея являлись: диангидрид 3,3',4,4'-бензофенон тетракарбоновой кислоты, эндиковый ангидрид, смесь ароматических диаминов с гибкоцепными фрагментами, смесь этилового абсолютного спирта и бутанола-1. Клей ВК-103 получали в реакторе, снабженном обогревом, мешалкой, обратным холодильником и термометром. Изготовление клея осуществляли в две стадии: *на первой стадии* получали смесь кислых эфиров карбоновых кислот путем взаимодействия соответствующих ангидридов с эквимолярным количеством смеси спиртов; *на второй стадии* осуществлялось взаимодействие смеси диаминов с полученным расплавом кислых эфиров карбоновых кислот. Клеевая масса представляет собой смесь имидообразующих компонентов, при отверждении которой образуется полиимид сетчатого строения. По внешнему виду клеевая масса представляет собой твердую смолу от светло-желтого до темно-коричневого цвета без механических включений. Соотношение исходных компонентов выбрано из расчета получения олигоимида с молекулярной массой, равной 1500 г/моль.

На основе полученной клеевой массы изготавливали пленочный клей, армированный нетканой стекловалью с поверхностной плотностью 30 г/м².

Кажущуюся вязкость по Брукфильду клеевой массы определяли по ГОСТ 25271–93, температуру стеклования отвержденного клея ВК-103 – методом ТМА по ГОСТ Р 56723–2015, температуру начала интенсивной термоокислительной деградации отвержденного клея ВК-103 – по ГОСТ Р 56721–2015.

Определяли прочность:

- при сдвиге клеевых соединений на основе клея марки ВК-103 и полос листового материала (стали 30ХГСА, титанового сплава ВТ6) – по ГОСТ 14759–69;
- при сдвиге клеевых соединений на основе клея марки ВК-103 и образцов ПКМ (стеклопластика ВПС-72, углепластика ВКУ-61) – по ГОСТ Р 57834–2017;
- при равномерном отрыве клеевых соединений на основе клея ВК-103 и цилиндрических «грибков» из титанового сплава ВТ6 – по ГОСТ 14760–69.

Результаты и обсуждение

Основным направлением работ при создании современных полиимидных клеев является повышение их термостойкости, механических характеристик и упрощение технологии склеивания. Наиболее успешно технологические проблемы без снижения тепло- и термостойкости решаются при использовании клеев на основе смесей имидообразующих мономеров [12, 13].

Установлено, что исходными компонентами для синтеза полиимидов являются ароматические амины и ангидриды карбоновых кислот и их производные. Физико-химические, эксплуатационные и технологические свойства полиимидов и их форполимеров существенно зависят от строения исходных компонентов, образующих основную цепь

полимера. Из научно-технических литературных источников [14, 15] известно, что при использовании исходных компонентов, образующих жесткоцепной полиимид без карбоновых или гибкоцепных фрагментов, значительно усложняется переработка ввиду нерастворимости и высоких температур плавления олигомеров.

Выбранные исходные компоненты и подобранные условия получения клеевой массы позволили достичь показателя содержания сухого вещества в имидообразующей смеси компонентов не менее 98 %. Высокая концентрация содержания сухого вещества в имидообразующей смеси компонентов клея ВК-103 позволила уменьшить содержание летучих веществ, выделяемых в процессе отверждения, и повысить технологичность при его использовании и переработке.

Для выбора оптимальных условий получения клеевой пленки (с требуемой поверхностной плотностью) исследованы реологические свойства полиимидного клея. Зависимость кажущейся вязкости клея ВК-103 от температуры и в процессе изотермической выдержки при температуре 80 °С представлены на рис. 1.

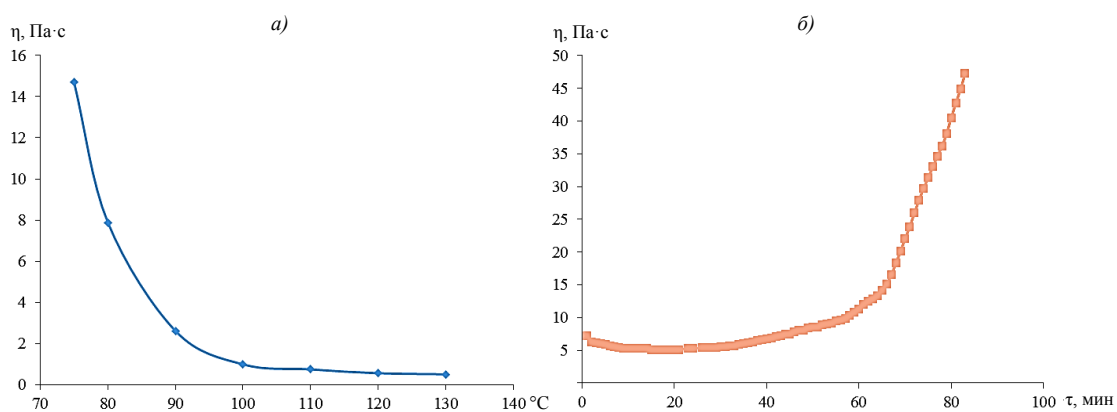


Рис. 1. Зависимости кажущейся вязкости (η) клея ВК-103 от температуры (а) и продолжительности (τ) выдержки при температуре 80 °С (б)

Показано, что наиболее оптимальные показатели вязкости клея ВК-103 для получения клеевой пленки и нанесения на стекловуаль наблюдаются в интервале температур 75–85 °С.

Пленочный клей ВК-103 получают с использованием пропиточной установки путем совмещения армирующего наполнителя с предварительно раскатанной клеевой пленкой. Расплавный метод пропитки позволил использовать в качестве армирующего наполнителя нетканую стекловуаль. Низкая поверхностная плотность нетканой стекловуали (30 г/м²) позволяет достичь высокого содержания полимерной основы в пленочном клее, поверхностная плотность пленки при этом составляет 300±50 г/м².

Использование нетканой стекловуали в качестве армирующего наполнителя позволило обеспечить клеевую прослойку необходимой формы и толщины, которая сохраняется при склеивании, обеспечивая тем самым повышение прочности клеевых соединений при сдвиге на 15–25 % (табл. 1).

Таблица 1

Прочность при сдвиге клеевых соединений на основе полиимидного клея ВК-103 и стали 30ХГСА

Температура испытания, °С	Прочность при сдвиге, МПа, для клея ВК-103	
	без армирования	с армированием
20	17,1–18,3	20,5–24,5
250	15,3–16,4	18,0–22,5
320	12,9–13,7	14,5–16,0

Для оценки термо- и теплостойкости разработанного полиимидного клея получены отвержденные образцы полимерной матрицы. Отверждение полиимидного клея ВК-103 является трехстадийным процессом (рис. 2) [16].

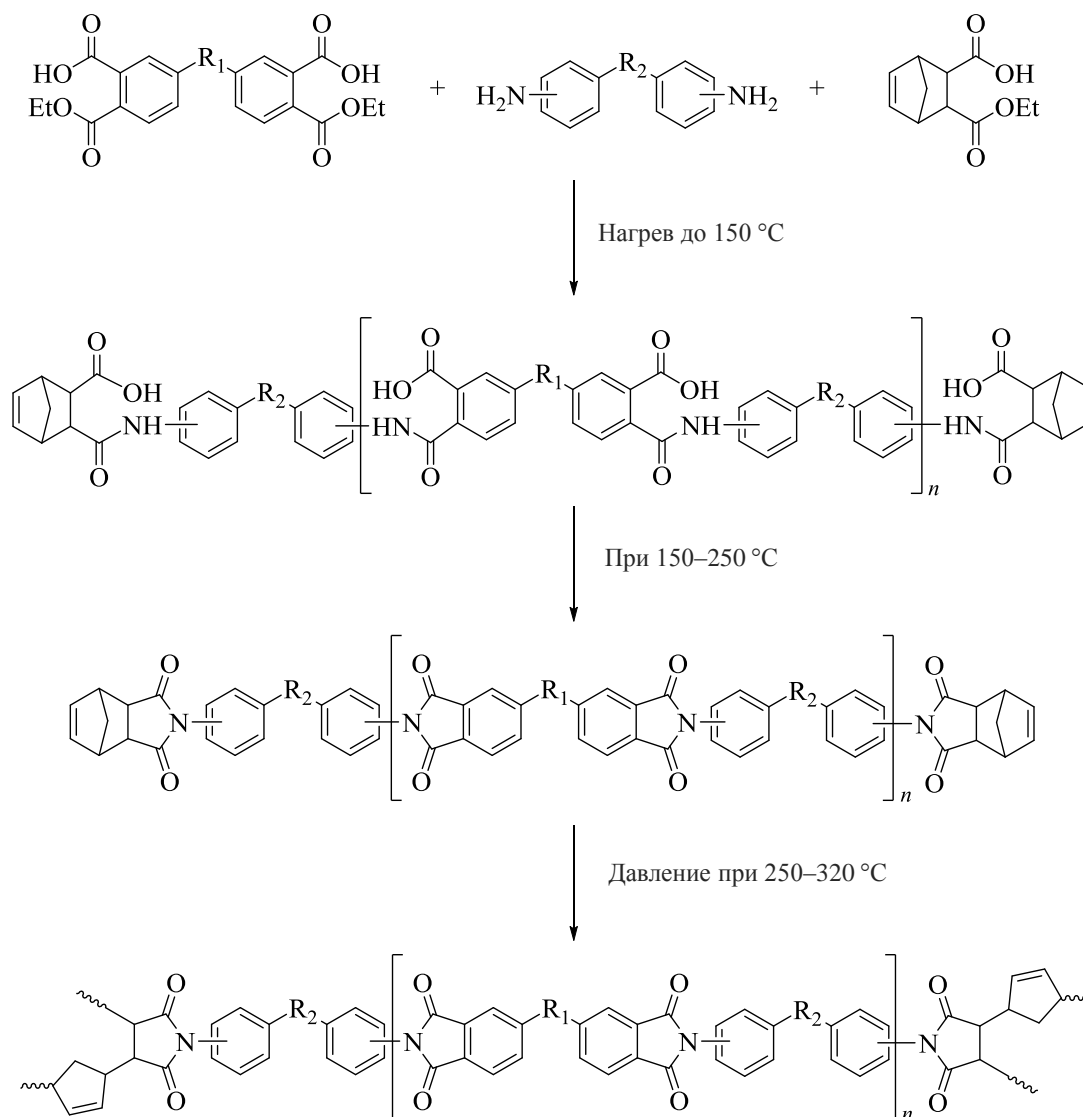


Рис. 2. Схема реакций, протекающих при отверждении клея марки ВК-103 (Et – этильная группа)

Первую и вторую стадии отверждения осуществляли при термообработке в вакуум-сушильном шкафу по ступенчатому режиму при температурах до 250 °С. На этих стадиях происходит образование линейных олигоимидов с выделением низкомолекулярных веществ по реакции поликонденсации.

Для проведения третьей стадии вспененный олигоимид, полученный на первых двух стадиях, измельчали в порошок и отверждали в закрытой пресс-форме с конечной температурой формования 320 °С при давлении до 1 МПа. На этой стадии происходит образование сетчатого полиимиды по ненасыщенным концевым группам по реакции полимеризации.

На рис. 3 представлены результаты термического анализа для отвержденного полиимидного клея ВК-103.

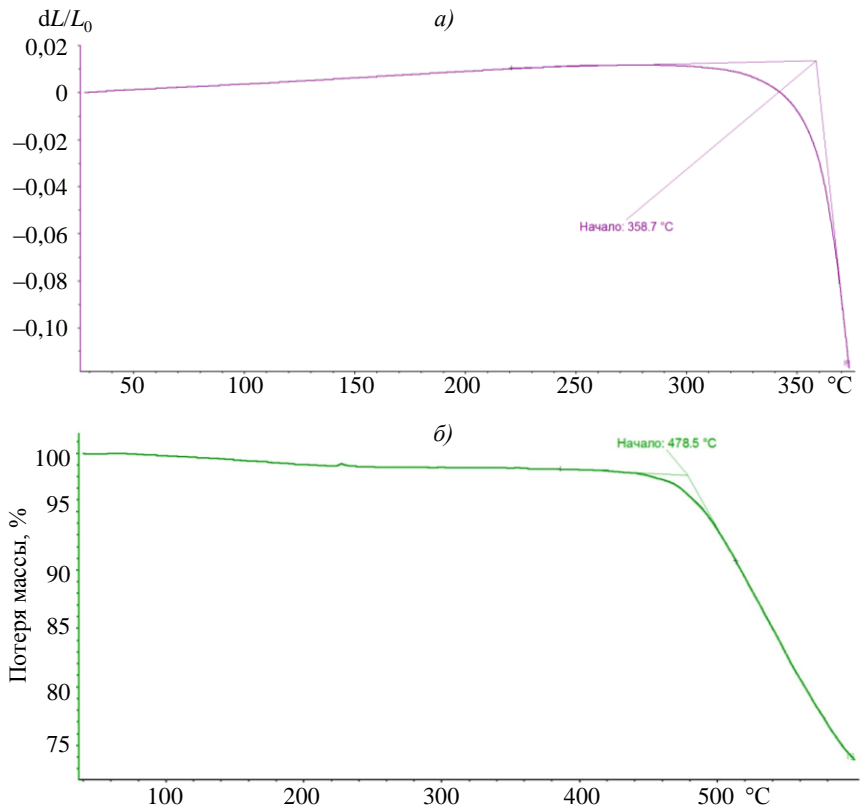


Рис. 3. Температуры стеклования (а) и начала интенсивной термоокислительной деструкции (б) отвержденного клея ВК-103

Установлено, что температура стеклования отвержденного клея составляет 359 °С, а температура начала интенсивной термоокислительной деструкции 479 °С. Данный уровень свойств позволяет обеспечить работоспособность клея при температурах >280 °С.

В табл. 2 представлены механические свойства клея ВК-103 при склеивании стали 30ХГСА, титанового сплава ВТ6, углепластика ВКУ-61 и стеклопластика ВПС-72.

Таблица 2

Механические свойства (средние значения) клея ВК-103

Свойства	Склеиваемые материалы	Значения свойств при температуре испытания, °С					
		-60	20	250	280	320	345
Прочность при сдвиге, МПа	Сталь 30ХГСА	24,0	23,0	20,8	21,2	15,1	16,8
	Титановый сплав ВТ6	13,6	12,3	12,3	12,7	13,1	13,6
	Углепластик ВКУ-61	–	10,4	–	–	12,0	–
	Стеклопластик ВПС-72	–	12,1	–	–	10,0	–
Прочность при равномерном отрыве, МПа	Титановый сплав ВТ6	–	9,8	–	–	–	–

Разработанный теплостойкий полиимидный пленочный клей ВК-103 обеспечивает высокие прочностные характеристики отвержденного клеевого соединения, а также их сохранение в широком интервале температур. Установлено, что разрушение клеевых соединений при склеивании различных материалов имеет когезионный характер.

При склеивании стали 30ХГСА прочность при сдвиге при 20 °С составляет 23,0 МПа, при 280 °С: 21,2 МПа и при 345 °С: 16,8 МПа. При склеивании титанового сплава ВТ6 отмечается сохранение прочностных характеристик в диапазоне от 12,3 до 13,6 МПа в интервале температур от –60 до +345 °С. Повышение значения прочности клеевого соединения при температуре 345 °С, по сравнению со значением при температуре 320 °С, при склеивании стали 30ХГСА или титанового сплава ВТ6 может быть связано с релаксацией внутренних напряжений в полимерной матрице. При склеивании образцов ПКМ получены следующие значения прочности при сдвиге: 10,4 МПа – для углепластика ВКУ-61 при 20 °С и 12,0 МПа – при 320 °С; 12,1 МПа – для стеклопластика ВПС-72 при 20 °С и 10,0 МПа – при 320 °С.

Согласно результатам проведенных испытаний, полиимидный клей ВК-103 рекомендуется для склеивания стали, титановых сплавов, многослойных конструкций из углепластика ВКУ-61 и стеклопластика ВПС-72.

Результаты теплового старения показали, что клей ВК-103 работоспособен в диапазоне температур от –60 до +320 °С, при температуре 280 °С в течение 200 ч, при температуре 320 °С в течение 20 ч.

Клеевые соединения на основе клея ВК-103 стойки к воздействию влаги, тропического климата, солевого тумана, химических сред, воды и др. Прочностные характеристики после воздействия составляют не менее 68 % от исходных значений. В табл. 3 представлены результаты испытаний клея ВК-103.

Таблица 3

Свойства клея ВК-103 после воздействия эксплуатационных факторов (средние значения)

Эксплуатационный фактор	Прочность при сдвиге клеевых соединений при склеивании стали 30ХГСА, МПа, при температуре, °С	
	20	320
Термовлажностное старение в течение 90 сут	16,6	17,5
Экспозиция в камере тропического климата в течение 90 сут	21,9	18,4
Экспозиция в камере солевого тумана в течение 30 сут	15,6	14,9
Воздействие масла ИПМ-10 в течение 15 сут	21,8	18,8
Воздействие топлива ТС-1 в течение 15 сут	22,3	19,5
Воздействие воды при температуре 20±2 °С в течение 30 сут	17,8	15,8

Исследования коррозионной агрессивности клея показали, что клей ВК-103 может быть использован для склеивания конструкционных, нержавеющей сталей, титановых сплавов и алюминиевых сплавов с анодно-окисными покрытиями с учетом допустимых нагревов в соответствии с отраслевой документацией.

Разработанный в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ полиимидный клей марки ВК-103 по свойствам не уступает зарубежным аналогам, обеспечивая высокие тепло- и термостойкость, а также уровень сохранения прочностных характеристик. При этом клей представляет собой армированную пленку, что значительно улучшает его технологические и эксплуатационные свойства.

В табл. 4 представлены свойства клея ВК-103 в сравнении с терморезистивными клеями зарубежных производителей.

Свойства клея ВК-103 в сравнении с полиимидными термореактивными клеями

Свойства	Значения свойств для клея			
	ВК-103	RM-1005 (Renegade Materials Corporation)	FM-35 (Cytec Solvay Group)	LARC-160 (NASA)
Температура стеклования, °С	359	327	–	–
Прочность при сдвиге (сталь), МПа	23,0 (при 20 °С); 15,1 (при 320 °С)	–	19,8 (при 25 °С); 14,3 (при 316 °С)	16,2 (при 25 °С); 13,8 (при 316 °С)
Прочность при сдвиге (титан), МПа	12,3 (при 20 °С); 13,1 (при 320 °С); 13,6 (при 345 °С)	17,9 (при 24 °С)	21,7 (при 25 °С); 13,8 (при 288 °С)	16,3 (при 25 °С); 14,1 (при 316 °С)
Прочность при сдвиге (ПКМ), МПа	10,4 (при 20 °С); 12,0 (при 320 °С)	17,2 (при 24 °С); 11,2 (при 316 °С); 6,4 (при 345 °С)	15,7 (при 25 °С); 14,0 (при 316 °С)	16,3 (при 25 °С); 13,8 (при 316 °С)

Заключения

В результате проведенных исследований разработан и паспортизован пленочный полиимидный клей ВК-103 с рабочей температурой до 320 °С.

Клеевые соединения на основе полиимидного пленочного клея марки ВК-103 обладают высокими прочностными характеристиками. Данный клей рекомендуется для склеивания стали, титановых сплавов, многослойных конструкций из углепластика ВКУ-61 и стеклопластика ВПС-72.

Полиимидный клей ВК-103 совместно с термостойкими ПКМ может найти широкое применение в авиационной и космической технике, подвергающейся длительному воздействию высоких температур.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 15.1. «Многофункциональные клеящие системы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [17].

Благодарности

Авторы выражают благодарность М.А. Жаринову, принимавшему участие в разработке полиимидного клея марки ВК-103.

Список источников

1. Русанов А.Л. Лестничные полигетероарилены – успехи и проблемы // Успехи химии. 1979. Т. XLVIII. Вып. 1. С. 115–147.
2. Hergenrother P.M. The use, design, synthesis, and properties of high performance/high temperature polymers: an overview // High Performance Polymers. 2003. Vol. 15. No. 1. P. 3–45.
3. Ebnesajjad S. Handbook of adhesives and surface preparation: technology, applications and manufacturing. William Andrew, 2010. 450 p.
4. Курносоев А.О., Раскутин А.Е., Мухаметов Р.Р., Мельников Д.А. Полимерные композиционные материалы на основе термореактивных полиимидных связующих для авиакосмической техники. Обзор // Вопросы материаловедения. 2016. № 4. С. 50–62.
5. 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://viam-works.ru> (дата обращения: 10.11.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53.
6. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. № 5. С. 7–27.

7. 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.
8. Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Мухаметов Р.Р., Панина Н.Н. Разработки ФГУП «ВИАМ» в области расплавных связующих для полимерных композиционных материалов // *Полимерные материалы и технологии*. 2016. Т. 2. № 2. С. 37–42.
9. Каблов Е.Н., Валуева М.И., Зеленина И.В., Хмельницкий В.В., Алексахин В.М. Углепластики на основе бензоксазиновых олигомеров – перспективные материалы // *Труды ВИАМ*. 2020. № 1 (85). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.10.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
10. Валуева М.И., Зеленина И.В., Жаринов М.А., Хасков М.А. Высокотемпературные углепластики на основе термореактивного полиимидного связующего // *Вопросы материаловедения*. 2020. № 3 (103). С. 89–102.
11. Колпачков Е.Д., Курносоев А.О., Папина С.Н., Петрова А.П. Особенности формования стеклопластиков на основе PMR-полиимидов // *Труды ВИАМ*. 2022. № 7 (113). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.11.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-37-49.
12. Михайлин Ю.А. Термостойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб.: Профессия, 2006. 624 с.
13. Subrahmanian K.P. High-Temperature Polymers and Adhesives // *Structural Adhesives: Chemistry and Technology* / ed. by S.R. Hartshorn. Boston: Springer, 1986. P. 309–345.
14. Rabilloud G. Heat-Resistant Adhesives // *Handbook of Adhesives and Surface Preparation*. William Andrew Publishing, 2011. P. 185–220.
15. Поциус А. Клеи, адгезия, технология склеивания: пер. с англ. СПб.: Профессия, 2016. 384 с.
16. Scola D.A., Vontell J.H. High temperature polyimides, chemistry and properties // *Polymer Composites*. 1988. Vol. 9. No. 6. P. 443–452.
17. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

References

1. Rusanov A.L. Ladder polyheteroarylenes – progress and problems. *Uspekhi khimii*, 1979, vol. XLVIII, is. 1, pp. 115–147.
2. Hergenrother P.M. The use, design, synthesis, and properties of high performance/high temperature polymers: an overview. *High Performance Polymers*, 2003, vol. 15, no. 1, pp. 3–45.
3. Ebnesajjad S. *Handbook of adhesives and surface preparation: technology, applications and manufacturing*. William Andrew, 2010, 450 p.
4. Kurnosov A.O., Raskutin A.E., Mukhametov R.R., Melnikov D.A. Polymer composite materials based on thermosetting polyimide binders for aerospace engineering. Review. *Voprosy materialovedeniya*, 2016, no. 4, pp. 50–62.
5. Gunyaeva A.G., Kurnosov A.O., Gulyaev I.N. High-temperature polymer composite materials developed FSUE «VIAM» for aerospace engineering: past, present and future (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 1 (95), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 10, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-43-53.
6. Kablov E.N. Materials for aerospace engineering. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2007, no. 5, pp. 7–27.
7. Mukhametov R.R., Petrova A.P. Thermosetting binders for polymer composites (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
8. Kablov E.N., Chursova L.V., Babin A.N., Mukhametov R.R., Panina N.N. Developments of FSUE "VIAM" in the field of melt binders for polymer composite materials. *Polimernye materialy i tehnologii*, 2016, vol. 2, no. 2, pp. 37–42.

9. Kablov E.N., Valueva M.I., Zelenina I.V., Khmel'nitskiy V.V., Aleksashin V.M. Carbon plastics based on benzoxazine oligomers – perspective materials. *Trudy VIAM*, 2020, no. 1, paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 31, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
10. Valueva M.I., Zelenina I.V., Zharinov M.A., Khaskov M.A. High-temperature carbon plastics based on thermosetting polyimide binder. *Voprosy materialovedeniya*, 2020, no. 3 (103), pp. 89–102.
11. Kolpachkov E.D., Kurnosov A.O., Papina S.N., Petrova A.P. Specificity of the formation of fiber-glass based on PMR-polyimides. *Trudy VIAM*, 2022, no. 6 (112), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 14, 2022) DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-37-49.
12. Mikhailin Yu.A. *Heat-resistant polymers and polymeric materials*. St. Petersburg: Professiya, 2006, 624 p.
13. Subrahmanian K.P. High-Temperature Polymers and Adhesives. *Structural Adhesives: Chemistry and Technology*. Ed. S.R. Hartshorn. Boston: Springer, 1986, pp. 309–345.
14. Rabilloud G. Heat-Resistant Adhesives. *Handbook of Adhesives and Surface Preparation*. William Andrew Publishing, 2011, pp. 185–220.
15. Potsius A. *Adhesives, adhesion, bonding technology*. Trans. from Engl. St. Petersburg: Profession, 2016, 384 p.
16. Scola D.A., Vontell J.H. High temperature polyimides, chemistry and properties. *Polymer Composites*, 1988, vol. 9, no. 6, pp. 443–452.
17. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

Информация об авторах

Ахмадиева Ксения Расимовна, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Петрова Алефтина Петровна, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Боков Виталий Викторович, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Ksenia R. Akhmadieva, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Aleftina P. Petrova, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Vitaliy V. Bokov, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 06.02.2023; получена после доработки 13.03.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 13.03.2023.

The article was submitted 06.02.2023; received in revised form 13.03.2023; approved and accepted for publication after reviewing 13.03.2023.