

Научная статья

УДК 678.067.5

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-42-54

СРАВНЕНИЕ СВОЙСТВ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИИМИДНЫХ СВЯЗУЮЩИХ РАСТВОРНОГО И РАСПЛАВНОГО ТИПА

А.О. Курносов¹, А.П. Петрова¹, А.В. Славин¹, М.И. Вавилова¹, Е.В. Куршев¹

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

Аннотация. В данной статье описаны особенности применения полиимидных связующих растворного и расплавного типа при изготовлении препрегов. Приведены основные физико-химические характеристики растворного связующего поликонденсационного типа СП-97С и расплавного связующего ВС-51 полимеризационного типа и препрегов на их основе. Исследованы механические характеристики стеклопластиков на основе данных связующих при комнатной и повышенной температурах. Проведен микроструктурный анализ поверхности расслоения образцов после испытания на сжатие при температуре 20 °С методом сканирующей электронной микроскопии.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, препрег, стеклопластик, полиимид, связующее, полимеризация, термостойкость

Для цитирования: Курносов А.О., Петрова А.П., Славин А.В., Вавилова М.И., Куршев Е.В. Сравнение свойств стеклопластиков на основе полиимидных связующих растворного и расплавного типа // Труды ВИАМ. 2022. № 10 (116). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-42-54.

Scientific article

COMPARISON OF THE PROPERTIES OF GLASS-REINFORCED PLASTICS BASED ON POLYIMIDE BINDERS OF SOLUTION AND MELT TYPE

А.О. Kurnosov¹, A.P. Petrova¹, A.V. Slavin¹, M.I. Vavilova¹, E.V. Kurshev¹

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

Abstract. This article describes the features of the use of polyimide binders of solution and melt type in the manufacture of prepregs. The main physical and chemical characteristics of the solution binder of the polycondensation type brand SP-97S and the melt binder VS-51 of the polymerization type and prepregs based on them are given. The mechanical characteristics of glass-reinforced plastics were studied on the basis of binder data at room and elevated temperatures. The microstructural analysis of the surface of delamination of the samples after the compression test at temperature 20 °C was carried out by the method of scanning electron microscopy.

Keywords: polymer composite material, prepreg, fiberglass, polyimide, binder, polymerization, heat resistance

For citation: Kurnosov A.O., Petrova A.P., Slavin A.V., Vavilova M.I., Kurshev E.V. Comparison of the properties of glass-reinforced plastics based on polyimide binders of solution and melt type. *Trudy VIAM*, 2022, no. 10 (116), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-42-54.

Введение

В различных областях авиационной и космической техники, в ракетно- и судостроении, радиоэлектронике и других отраслях промышленности наиболее актуальным направлением следует считать «Полимерные композиционные материалы» (ПКМ) [1–3].

Возрастание скоростей авиационной и ракетной техники выдвигает на первый план требования к повышению рабочих температур используемых материалов, к максимальному сохранению их механических и тактико-технических характеристик при длительном воздействии высоких температур [4–6].

В настоящее время стеклопластики являются наиболее широко изученными материалами из класса ПКМ и благодаря хорошему сочетанию физико-механических, электроизоляционных, оптических и других свойств применяются в различных отраслях промышленности. В качестве стеклянных армирующих наполнителей применяются волокна, микросферы и другие мелкодисперсные наполнители, которые обеспечивают высокие механические характеристики, термостойкость, химическую устойчивость и хорошие диэлектрические свойства.

Для обеспечения необходимых диэлектрических и механических характеристик ПКМ, кроме армирующего наполнителя, существенное значение имеет связующее. Так, связующее с недостаточной когезионной прочностью, т. е. повышенной хрупкостью и недостаточной адгезией к наполнителю, не позволяет реализовать в ПКМ высокий комплекс упруго-прочностных свойств. Сказывается также наличие в отвержденном связующем внутренних напряжений, характеризующихся большим количеством трещин, дефектов в виде пор и др. [7–9].

В настоящее время разработаны и широко применяются материалы на основе фенолформальдегидных смол, циановых эфиров, бисмалеинимидных, кремнийорганических, полиимидных и фталонитрильных связующих, которые могут длительно эксплуатироваться при температурах 180–350 °С, кратковременно (от нескольких секунд до нескольких минут) – при воздействии высокотемпературных тепловых потоков: до ~1200 °С [10, 11].

Так, фенолформальдегидные смолы и их модификации широко применяются в качестве связующих для стеклопластиков, длительно работоспособных при температурах 150–200 °С и в течение нескольких часов при 250–300 °С. Эти полимеры нашли широкое применение благодаря способности образовывать прочный кокс в абляционных материалах, кратковременно (в течение нескольких десятков секунд) работающих при высокотемпературных тепловых потоках, которые создают на поверхности материала температуру ~1000 °С.

Бисмалеинимидные и цианэфирные связующие применяются для изготовления стекло-, угле- и органопластиков, эксплуатируемых при температурах 200–250 °С в авиакосмической технике и ракетостроении. Полимерные композиционные материалы на их основе характеризуются минимальным содержанием пор, за счет чего реализуется повышенный комплекс эксплуатационных характеристик, что позволяет применять их для производства передних кромок крыльев самолетов, деталей рулевой системы, крышек люков багажных отделений, антенных обтекателей, носовых частей самолета, стабилизаторов и др.

В качестве термостойких материалов также широко используются стеклопластики на основе кремнийорганических смол, отличающиеся высокой термоокислительной устойчивостью, хорошими диэлектрическими свойствами и рядом специфических характеристик. Эти материалы находят применение для деталей радиотехнического и специального назначения.

Существенным недостатком этих стеклопластиков является необходимость применения растворителей в процессе приготовления связующих и пропитке

армирующих наполнителей, что существенно снижает экологическую безопасность производства, повышает пористость стеклопластиков и приводит к снижению комплекса эксплуатационных характеристик. Несколько меньшую термостойкость, но достаточно высокую межслойную прочность имеют стеклопластики на основе связующих гетероциклического строения. Их высокая термостойкость обусловлена строением полимеров, основные цепи которых состоят из ароматических ядер, соединяемых друг с другом посредством гетероциклов.

Высокотемпературные фталонитрильные связующие, как правило, получают в виде порошков, расплавы которых при температурах $>160\text{ }^{\circ}\text{C}$ имеют низкую вязкость ($<0,01\text{ Па}\cdot\text{с}$), что позволяет применять для переработки в ПКМ методы пропитки под давлением и вакуумную инфузию. Однако их существенным недостатком является близость значений температур плавления исходного мономера и начала полимеризации, что оставляет узкий технологический интервал для пропитки и особенно осложняет формование крупногабаритных изделий. Следует также отметить, что для реализации требуемого уровня свойств ПКМ на основе фталонитрилов необходима дополнительная высокотемпературная термообработка в инертной среде.

В ряду гетероциклических полимеров наиболее важное место занимают полиимиды, обладающие высокой термостойкостью, хорошими механическими и диэлектрическими свойствами в широком диапазоне температур, радиационной стойкостью и другими специальными характеристиками. Температура эксплуатации стеклопластиков на основе полиимидов составляет $\sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$, а стабильность этих полимеров обусловлена их циклической структурой, представляющей собой систему непрерывно чередующихся ароматических и гетероциклических колец, содержащих минимальное количество легкоокисляющихся групп со стабильными связями между структурными звеньями [12, 13].

Разработанный в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ (далее – ВИАМ) листовой стеклотекстолит СП-97с на основе растворного полиимидного связующего СП-97С рекомендуется для деталей, эксплуатируемых до температур $350\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$, с сохранением при этом высоких упруго-прочностных свойств.

Однако при переработке в полуфабрикаты (препреги) и изделия связующее СП-97С имеет ряд технологических особенностей из-за поликонденсационного механизма реакции отверждения и, соответственно, значительного количества выделяемых летучих продуктов реакции. Наиболее интенсивно поликонденсация связующего протекает в интервале температур от 160 до $170\text{ }^{\circ}\text{C}$, в этом же интервале резко повышается жесткость полимера. Дальнейшее структурирование полимера сопровождается выделением летучих с максимальной скоростью до температуры $\sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ввиду описанных технологических особенностей применения связующего СП-97С, ПКМ на его основе характеризуются высокой пористостью – до 20% , которая оказывает негативное влияние на уровень упруго-прочностных свойств материалов как при комнатной, так и при повышенных температурах. Следует также отметить низкую экологическую безопасность производства полуфабрикатов на основе растворного полиимидного связующего, обусловленную выделением большого количества легколетучих веществ, а также склонность к седиментации или расслоению, что может привести к нестабильности процесса изготовления препрега и, соответственно, к существенному разбросу значений по массовым характеристикам (содержание связующего в препреге).

С учетом современных мировых тенденций в области технологий переработки полимерных композитов [14], в ВИАМ выполнены исследования по разработке нового расплавного полиимидного связующего марки ВС-51 полимеризационного типа отверждения. Данная разработка позволяет реализовать расплавную технологию переработки в полуфабрикаты на современном пропиточном оборудовании – это обеспечивает высокую точность и минимальный разброс значений по массовым

характеристикам полуфабрикатов ($\pm 3\%$ (по массе)), а также экологичность и высокую культуру производства. Поэтому исследование комплекса характеристик стеклопластиков, изготовленных с применением полиимидных связующих растворного и расплавного типа, является актуальной и наукоемкой задачей.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [15].

Материалы и методы

Выбраны ПКМ на основе полиимидных связующих, разработанных в ВИАМ: стеклопластик СП-97с, который изготавливается на основе связующего СП-97С (ТУ 2224-415-00209349–2000) и стеклоткани Т-10-80 (ТУ 5952-002-775184434–2008); стеклопластик ВПС-72 на основе связующего ВС-51 (ТУ 1-595-12-1682–2017) и стеклоткани Т-10-14 (ГОСТ 19170–2001).

Стеклоткань сатинового переплетения типа Т-10 с поверхностной плотностью 296 ± 15 г/м² и активными замасливателями № 14 и № 80 вырабатывается из стекла алюмоборосиликатного состава (тип Е). В активных замасливателях № 14 и № 80 применяется одно и то же химическое адгезионное вещество, а механические свойства стеклонитей являются равнозначными.

Связующее марки СП-97С поликонденсационного типа представляет собой 60%-ный раствор имидообразующей смеси компонентов в низкокипящем растворителе, в которой при отверждении образуется линейный полимер (рис. 1). Схема реакции поликонденсации связующего марки СП-97С представлена на рис. 1.

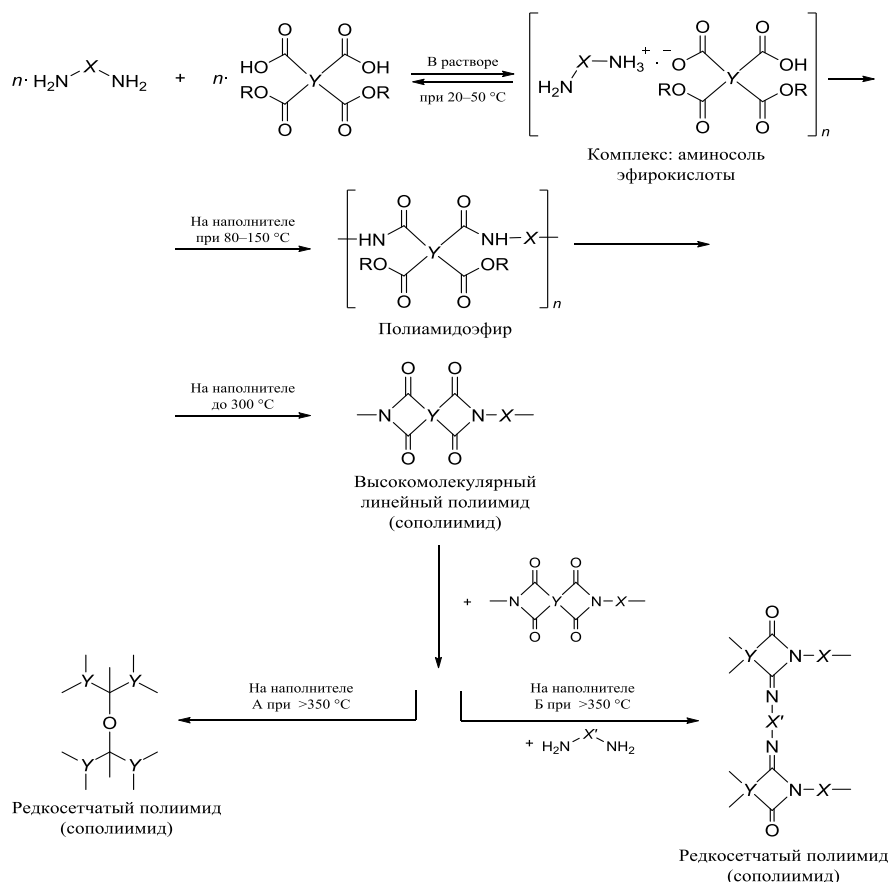


Рис. 1. Схема реакции поликонденсации связующего марки СП-97С

Связующее марки ВС-51 полимеризационного типа представляет собой имидообразующую смесь компонентов в виде расплава, которая при отверждении образует сетчатый полимер. Схема реакции полимеризации связующего марки ВС-51 представлена на рис. 2.

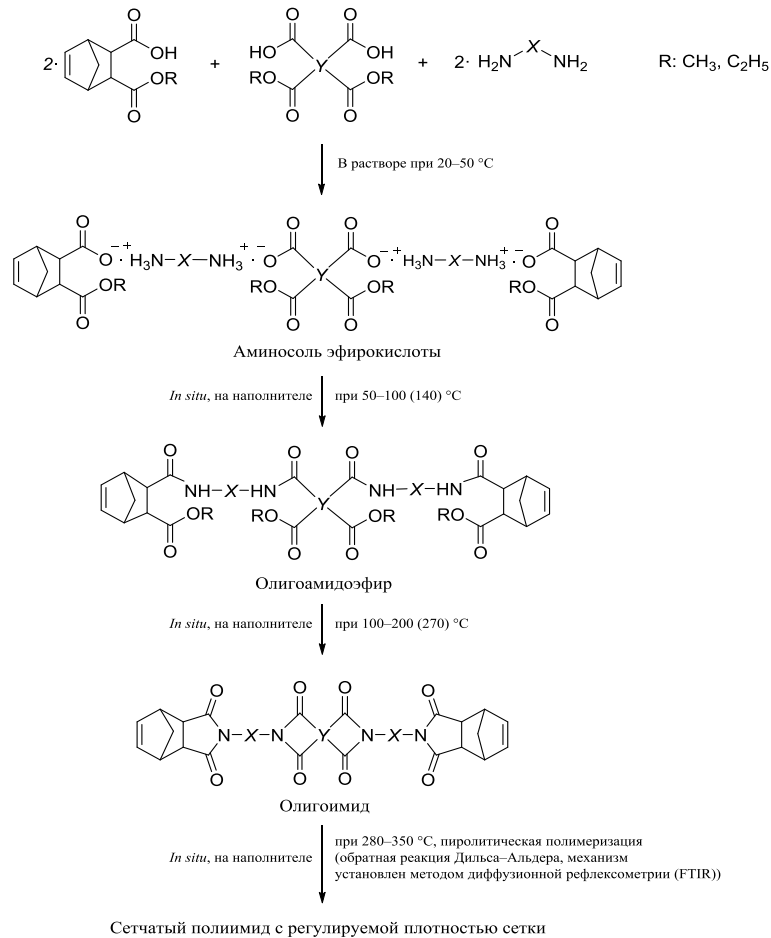


Рис. 2. Схема реакции полимеризации связующего марки ВС-51

Результаты и обсуждение

Связующее ВС-51 характеризуется высоким содержанием сухого вещества (98–100 %) и отсутствием в его составе растворителя, благодаря чему суммарное число летучих продуктов снижено до 5 % (по массе). Аналогичный показатель в среднем в 3,5 раза выше у связующего СП-97С.

С переходом при изготовлении ПКМ на наиболее оптимальные по характеристикам полимерные связующие расплавного типа, не содержащие растворителей, возникает проблема качественной пропитки армирующих наполнителей, так как в связи с повышением вязкости связующего (в расплаве) число воздушных включений, т. е. непропитанных участков, возрастает. При некотором критическом значении воздушные участки становятся непрерывными, т. е. сердцевина нити остается непропитанной – сухая нить оказывается в полимерной «рубашке». Для решения данной проблемы применяются различные технологические приемы: выбор оптимальной вязкости связующего и скорости пропитки, перегибы наполнителя в пропиточной установке, отжим связующего через каландры и др. [16, 17]. Выбор оптимальной вязкости полимерного связующего при пропитке наполнителя с заданной

скоростью сводится к подбору температурного диапазона нагрева связующего в процессе пропитки. Таким образом, подбирают такую температуру нагревательных элементов пропиточной установки, при которой для осуществления пропитки наполнителя с заданной скоростью жизнеспособность связующего должна быть достаточно длительной, а вязкость – достаточно низкой.

Так, для изготовления препрега стеклопластика на основе связующего ВС-51 выбрана оптимальная температура валов коутера. Установлено, что при температуре коутера $<60\text{ }^{\circ}\text{C}$ требуется снизить скорость пропитки, что непроизводительно, а при температуре $>90\text{ }^{\circ}\text{C}$ начинается неконтролируемое нарастание вязкости расплава связующего вследствие начинающейся полимеризации и весь процесс пропитки становится крайне нестабильным. Установлено также, что при температурах плит и каландров $>90\text{ }^{\circ}\text{C}$ качество пропитки наполнителя становится неудовлетворительным (визуально), так как в стеклопластике на основе такого препрега, как правило, возрастает вероятность повышения пористости и, как следствие, снижаются прочностные характеристики. Более высокие температуры ($>120\text{ }^{\circ}\text{C}$) вызвали преждевременное отверждение связующего в препреге.

Несмотря на то что связующее марки ВС-51 является расплавленным, оно содержит остаточное количество растворителя, необходимого на этапе изготовления самого связующего – не более 2 % (по массе), а также отличается наличием летучих, которые являются промежуточными продуктами реакции полимеризации и выделяются при температурах $>200\text{ }^{\circ}\text{C}$ – до 5–6 % (по массе). Сравнительные характеристики препрегов стеклопластиков представлены в табл. 1, внешний вид препрегов – на рис. 3.

Таблица 1

Сравнительные характеристики препрегов стеклопластиков

Свойства	Значения свойств для препрега стеклопластика	
	СТП-97с	ВПС-72
Поверхностная плотность препрега, г/м^2	–	476–563
Массовая доля связующего в препреге, % (по массе)	25–35	42–46
Массовая доля летучих продуктов в препреге, % (по массе)	8–11	3–6
Текучесть смолы в препреге, %	–	Не менее 25

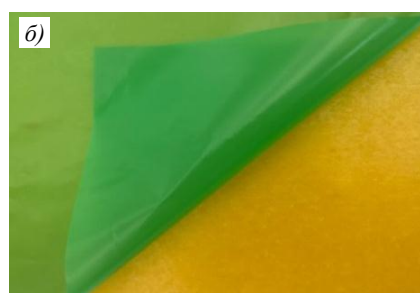


Рис. 3. Внешний вид препрегов стеклопластиков СТП-97с (а) и ВПС-72 (б)

По результатам проведенных исследований свойств препрегов стеклопластиков (табл. 1) показано, что содержание летучих в препреге на основе связующего СП-97С более чем в 2 раза превышает аналогичный показатель в препреге на основе связующего ВС-51. Как известно, большее содержание летучих продуктов при нагреве в процессе формования изделия приводит к скоплению и компрессии их паров между слоями. Сжатые пары после снятия давления расширяются, образуя расслоение

материала, пузыри, пористость и прочие дефекты, что в свою очередь оказывает значительное влияние на характеристики. В табл. 2 представлены физические характеристики стеклопластиков.

Таблица 2

Физические характеристики стеклопластиков

Свойства	Значения свойств для стеклопластика	
	СТП-97с	ВПС-72
Содержание связующего в стеклопластике, % (по массе)	17–29	32–33
Плотность, г/см ³	1,65–1,90	1,88–1,94
Пористость, %	6–10	1–2

В результате исследований физических характеристик стеклопластиков установлено, что пористость стеклопластика на основе связующего поликонденсационного типа в несколько раз превышает аналогичный показатель для образцов из стеклопластика ВПС-72.

Для оценки качества изготовленных образцов стеклопластиков проведено исследование их микроструктуры на металлографическом комплексе фирмы Leica при увеличении $\times 200$. Съёмку изображений вели с помощью цифровой камеры VEC-335 (3 мегапиксела) и компьютерной программы Image Expert Pro 3х.

Пробоподготовку образцов из стеклопластиков проводили на оборудовании фирмы Struers, механическую подготовку – на шлифовально-полировальном станке Tegamin-25, выравнивание поверхности – на диске MD-Primo 320-4000 с использованием воды, тонкое шлифование – на диске MD-Largo с использованием алмазной суспензии с размером частиц 9 мкм, алмазную полировку – на диске MD-Dac с использованием алмазной суспензии зернистостью 3 и 1 мкм. После полирования образцы промывали водой и просушивали. На рис. 4 представлены фотографии микроструктуры образцов из стеклопластиков СТП-97с и ВПС-72.

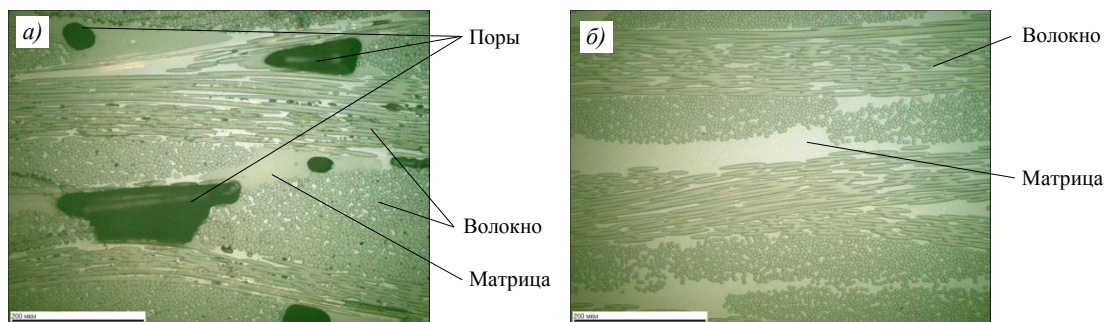


Рис. 4. Микроструктура ($\times 200$) образцов стеклопластиков СТП-97с (а) и ВПС-72 (б)

Исследование микроструктуры образцов показало, что в образце стеклопластика СТП-97с обнаружено значительное количество дефектов в виде пор (рис. 4, а), что существенно отличается от количества дефектов в образце из стеклопластика ВПС-72 (рис. 4, б).

Наличие пор в ПКМ оказывает существенное влияние на изменение свойств конечных деталей – работоспособность конструкции уменьшается из-за снижения сопротивления различным типам нагрузок [18, 19].

Проведен также микроструктурный анализ с применением метода сканирующей электронной микроскопии поверхности расслоения образцов из стеклопластиков СТП-97с и ВПС-72 после испытания на сжатие при температуре 20 °С.

При подготовке к микроструктурным исследованиям образцы расслаивали между слоями ткани на две части по образовавшейся после испытания на сжатие трещине. Далее полученные поверхности приклеивали токопроводящим клеем к специальным держателям для сканирующего электронного микроскопа и сушили при комнатной температуре до полного отверждения клея. Для выявления тонкой структуры материала образцы подвергали ионно-плазменному травлению в вакуумной установке JFC-1100 (Jeol). Для увеличения электропроводности, необходимой при исследованиях стеклопластиков на электронном микроскопе, поверхность образцов металлизировали в вакуумной установке магнетронного распыления Q150R ES.

Подготовленные образцы стеклопластиков СТП-97с и ВПС-72 исследовали на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 XMU в режиме вторичных электронов при увеличениях от $\times 2000$ до $\times 20000$.

Результаты микроструктурных исследований приведены на рис. 5 и 6.

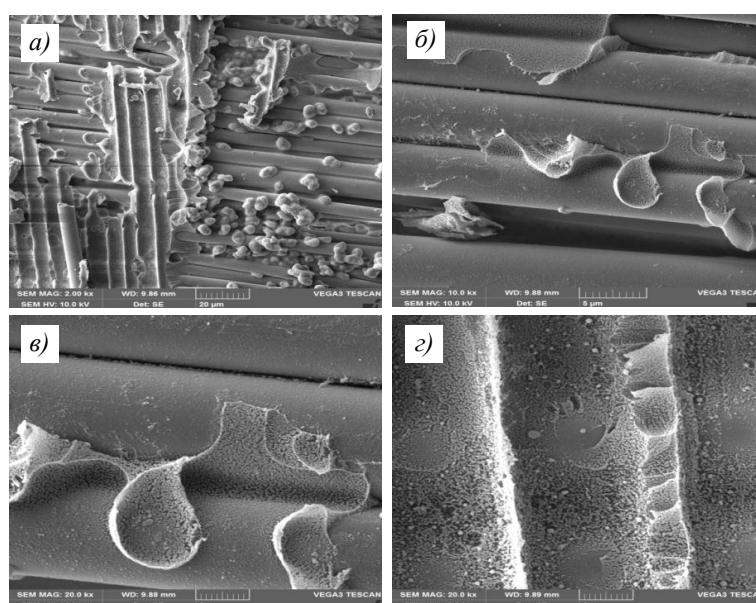


Рис. 5. Микроструктура поверхности расслоения стеклопластика СТП-97с после испытания на сжатие: *a* – волокна и неоднородная структура матрицы ($\times 2000$); *б*, *в* – пленка матрицы на поверхности волокон (*б* – $\times 10000$; *в* – $\times 20000$); *г* – матрица под волокнами ($\times 20000$)

Видно, что в образце стеклопластика СТП-97с происходит неполное совмещение компонентов растворного связующего (рис. 5, *a*). Выявлены две фазы: сплошная с мелкодисперсной структурой и округлая, которая хаотично распределена в объеме композита. Расслоение материала в основном проходит по адгезионному механизму, т. е. по границе раздела «волокно–матрица». Полимерная матрица частично заполняет пространство между стеклянными волокнами (рис. 5, *б*, *в*). На поверхности стеклянных волокон практически отсутствует полимерная пленка.

Разрушение стеклопластика ВПС-72 после испытания на сжатие происходит по смешанному механизму (рис. 6). Расплавное связующее проникает в пространство между стеклянными волокнами и заполняет его (рис. 6, *a–в*). При разрушении композита матрица между волокнами фрагментируется и образуются разнонаправленные торсионы различного размера. Микрофазовая структура матрицы однородная с мелкодисперсной структурой (рис. 6, *г*) [20, 21].

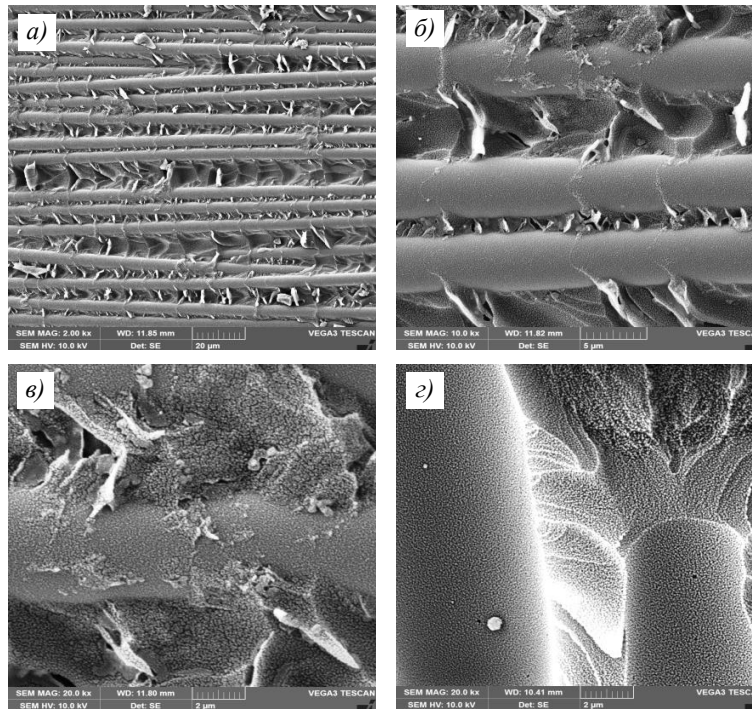


Рис. 6. Микроструктура стеклопластика ВПС-72: а, б – торсионное разрушение матрицы между волокнами (а – $\times 2000$; б – $\times 10000$); в – граница раздела «волокно–матрица» ($\times 20000$); г – матрица под волокнами ($\times 20000$)

Физико-механические характеристики стеклопластиков СТП-97с и ВПС-72 представлены в табл. 3.

Таблица 3

Физико-механические характеристики стеклопластиков СТП-97с и ВПС-72

Свойства	Температура испытания, °С	Значения свойств* для стеклопластика	
		СТП-97с	ВПС-72
Предел прочности при растяжении, МПа	20	<u>320–355</u> 336	<u>420–540</u> 500
	320	<u>150–290</u> 228	<u>340–500</u> 455
Предел прочности при сжатии, МПа	20	<u>170–185</u> 177	<u>315–560</u> 420
	320	<u>130–200</u> 156	<u>240–350</u> 300
Предел прочности при изгибе, МПа	20	<u>520–620</u> 572	<u>610–870</u> 780
	320	<u>335–435</u> 399	<u>440–670</u> 590

* В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

Из представленных в табл. 3 данных видно, что наличие большего количества дефектов в виде пор в стеклопластике СТП-97с оказывает существенное влияние на прочностные характеристики композита, снижая их уровень до 57 % (в сравнении со стеклопластиком ВПС-72). Одной их важнейших характеристик ПКМ остается зависимость их механических свойств от температуры и длительности ее воздействия. По результатам проведенных испытаний определено, что механические характеристики образцов стеклопластиков при температуре 320 °С (выдержка 30 мин) остаются на высоком уровне – сохранение значений свойств составляет в среднем 77 %.

Проведено определение температуры стеклования связующего в составе стеклопластиков методом динамического механического анализа, а также дана оценка водо- и влагопоглощения. На рис. 7 представлены результаты исследования температуры стеклования связующего в составе стеклопластиков СПП-97с и ВПС-72.

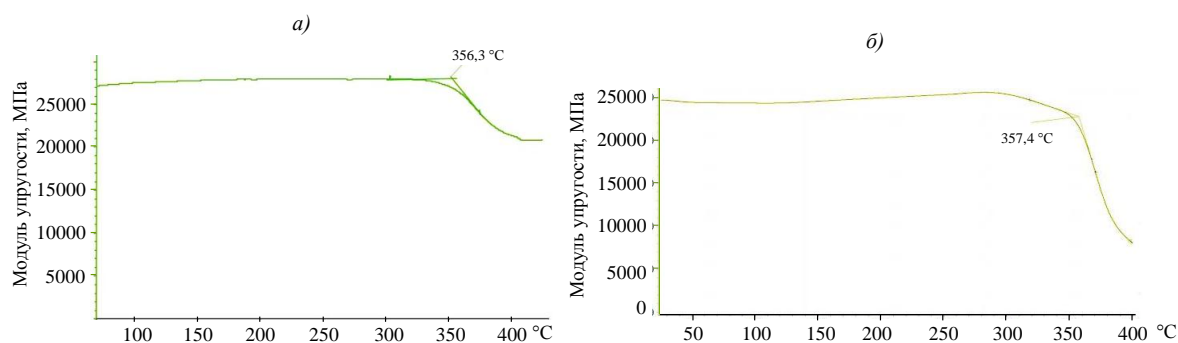


Рис. 7. Температура стеклования связующего в составе стеклопластиков СПП-97с (а) и ВПС-72 (б)

Из представленных результатов следует отметить высокие значения температуры стеклования образцов стеклопластиков – в среднем 357 °С, что дает возможность рекомендовать данные материалы для работы в условиях повышенных температур – вплоть до 320 °С.

На рис. 8 представлены результаты оценки влаго- и водопоглощения образцов из стеклопластиков СПП-97с и ВПС-72.

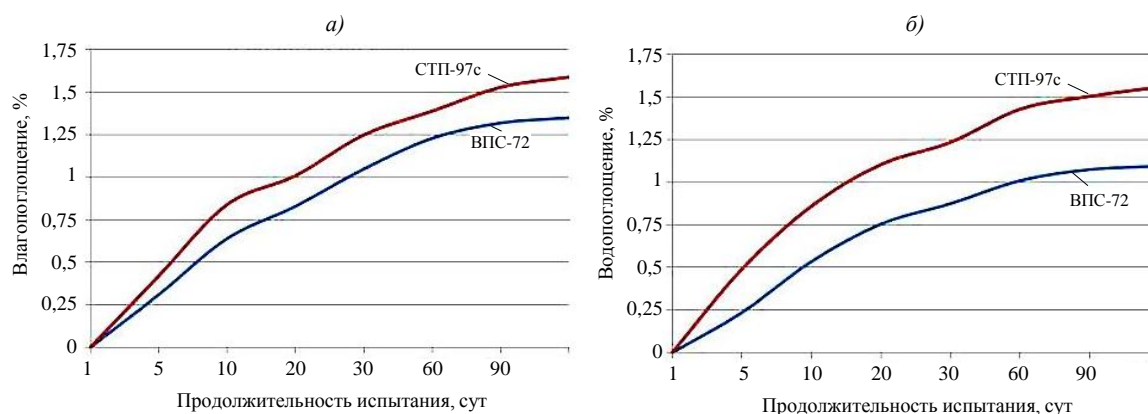


Рис. 8. Диаграммы влаго- (а) и водопоглощения (б) образцов стеклопластиков СПП-97с и ВПС-72

Значения влаго- и водопоглощения стеклопластика на основе связующего СП-97С увеличиваются равномерно и не выходят на плато при увеличении массы до 1,59–3,12 % в течение 3 мес (90 сут), что свидетельствует о высокой пористости материала.

Значения влаго- и водопоглощения стеклопластика на основе связующего ВС-51 также увеличиваются равномерно и выходят на плато при увеличении массы до 1,35–2,19 %.

Установлено, что влаго- и водопоглощение стеклопластика на основе связующего СП-97С почти в 1,5 раза больше, чем у стеклопластика на основе связующего ВС-51.

На основании полученных результатов исследований и оценки влаго- и водопоглощения стеклопластиков на основе полиимидных связующих растворного типа СП-97С и расплавленного типа ВС-51 в течение 1 мес установлено, что стеклопластик на

основе растворного связующего СП-97С более чувствителен к воздействию влаги и имеет повышенные значения влаго- (1,59 %) и водопоглощения (3,12 %) в сравнении со стеклопластиком на основе расплавного связующего ВС-51 (влагопоглощение составляет 1,35 %, водопоглощение: 2,19 %), что напрямую связано с наличием пор и пустот в материале на основе растворного связующего (пористость ~10 %).

Заключения

По результатам проведенных работ установлено, что стеклопластик ВПС-72 на основе связующего ВС-51, получаемый по расплавной технологии с полимеризационным типом отверждения, превосходит по физико-механическим характеристикам в 2 раза стеклопластик СТП-97с на основе связующего СП-97С, получаемый по растворной технологии с поликонденсационным типом отверждения.

Определено, что сохранение механических свойств образцов из стеклопластиков СТП-97с и ВПС-72 при температуре испытания 320 °С находится на одном уровне и составляет в среднем 77 %, а температура стеклования находится в одном температурном интервале (356–357 °С), что свидетельствует о работоспособности данных материалов при температурах до 300–320 °С.

Исследование водо- и влагопоглощения стеклопластиков в течение 3 мес показало, что стеклопластик на основе растворного связующего СП-97С более чувствителен к воздействию влаги и имеет повышенные значения влаго- (1,59 %) и водопоглощения (3,12 %) в сравнении со значениями для стеклопластика на основе расплавного связующего ВС-51 (1,35 и 2,19 % соответственно), что связано с наличием пор и пустот в материале на основе растворного связующего.

Благодарности

Авторский коллектив выражает благодарность за проведенные исследования и консультации инженеру 2 категории НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ М.Э. Рабкевич.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 7–17.
2. Крамарев Д.В. Композиционные материалы на основе термопластичного полиимида и полиарамидной ткани: дис. ... канд. техн. наук. М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева. 2018. 137 с.
3. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
4. Жаринов М.А., Петрова А.П., Бабчук И.В., Ахмадиева К.Р. Теплостойкие полиимидные конструкционные клеи // Клеи. Герметики. Технологии. 2021. № 4. С. 2–8.
5. Бондалетова Л.И., Бондалетов В.Г. Полимерные композиционные материалы (часть 1): учеб. пособие. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2013. С. 5–7.
6. Жаринов М.А., Шимкин А.А., Ахмадиева К.Р., Зеленина И.В. Особенности и свойства расплавного полиимидного связующего полимеризационного типа // Труды ВИАМ. 2018. № 12 (72). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.12.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-46-53.
7. Стеклотекстолиты и другие конструкционные пластики: сб. статей / под ред. Я.Д. Аврасина. М.: Оборонгиз, 1960. 169 с.
8. Коршак В.В. Термостойкие полимеры. М.: Наука, 1969. 381 с.
9. Раскутин А.Е., Соколов И.И., Шульдешова П.М., Куцевич К.Е., Гуляев И.Н. Конструкционные углепластики, стеклопластики и органопластики для высоко- и средненагруженных конструкций // Сб. тез. докл. XX Междунар. науч.-техн. конф. «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов». Обнинск: ОНПП «Технология, 2013. С. 67–69.

10. Колпачков Е.Д., Вавилова М.И., Курносов А.О., Гуняева А.Г. Стеклопластики на основе терморезактивных полиимидных связующих // Материалы Всерос. науч.-техн. конф. «Полимерные композиционные материалы нового поколения для гражданских отраслей промышленности». М.: ВИАМ, 2020. С. 31–41. URL: <https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1294.pdf> (дата обращения: 04.12.2021).
11. Валуева М.И., Зеленина И.В., Жаринов М.А., Ахмадиева К.Р. Мировой рынок высокотемпературных полиимидных углепластиков (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 12 (84). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.04.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-67-79.
12. Курносов А.О., Раскутин А.Е., Мухаметов Р.Р., Мельников Д.А. Полимерные композиционные материалы на основе терморезактивных полиимидных связующих // Вопросы материаловедения. 2016. № 4. С. 50–62.
13. Справочник по композиционным материалам: в 2 кн. / под ред. Дж. Любина. М.: Машиностроение, 1988. Кн. 1. 448 с.
14. Вешкин Е.А. Технологии безавтоклавного формования низкопористых полимерных композиционных материалов и крупногабаритных конструкций из них: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИАМ, 2016. 23 с.
15. 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.
16. Цыплаков О.Г. Научные основы технологии композиционно-волоконистых материалов. Пермь, 1974. С. 36–38.
17. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
18. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Измерение и прогнозирование температуры образцов материалов при экспонировании в различных климатических зонах // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58.
19. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
20. Кобец Л.П., Деев И.С. Структурообразование в терморезактивных связующих в матрицах композиционных материалов на их основе // Российский химический журнал Химического общества им. Д.И. Менделеева. 2010. № 1. С. 67–78.
21. Деев И.С., Старцев В.О., Никишин Е.Ф. Фрактографический анализ углепластика КМУ-4л после 12 лет экспозиции на внешней поверхности международной космической станции и последующих испытаний на изгиб // Вопросы материаловедения. 2015. № 3 (83). С. 140–149.

References

1. Kablov E.N. The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period to 2030. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 7–17.
2. Kramarev D.V. *Composite materials based on thermoplastic polyimide and polyaramid fabric*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow: Mendeleev Russian Chemical Technical University, 2018, 137 p.
3. Raskutin A.E. Development strategy of polymer composite materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
4. Zharinov M.A., Petrova A.P., Babchuk I.V., Akhmadieva K.R. Heat-resistant polyimide structural adhesives. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2021, no. 4, pp. 2–8.
5. Bondaletova L.I., Bondaletov V.G. *Polymer composite materials (part 1)*: textbook. Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2013, pp. 5–7.
6. Zharinov M.A., Shimkin A.A., Akhmadieva 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: December 4, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-46-53.
7. *Fiberglass and other structural plastics*: collection of articles. Ed. Ya.D. Avrasin. Moscow: Oborongiz, 1960, 169 p.
8. Korshak V.V. *Heat resistant polymers*. Moscow: Nauka, 1969, 381 p.

9. Raskutin A.E., Sokolov I.I., Shuldeshova P.M., Kutsevich K.E., Gulyaev I.N. Structural carbon plastics, fiberglass and organoplastics for high- and medium-loaded structures. *Report of XX Int. sci.-tech. conf. "Designs and technologies for the production of products from non-metallic materials"*. Obninsk: ONPP Tekhnologiya, 2013, pp. 67–69.
10. Kolpachkov E.D., Vavilova M.I., Kurnosov A.O., Gunyaeva A.G. Glass-reinforced plastics based on thermosetting polyimide binders. *Materials of All-Rus. sci.-tech. conf. "Polymer composite materials of a new generation for civil industries"*. Moscow: VIAM, 2020, pp. 31–41. Available at: <https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1294.pdf> (accessed: December 4, 2021).
11. Valueva M.I., Zelenina I.V., Zharinov M.A., Akhmadieva K.R. World market of high temperature polyimide carbon plastic (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 12 (84), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 4, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-67-79.
12. Kurnosov A.O., Raskutin A.E., Mukhametov R.R., Melnikov D.A. Polymer composite materials based on thermosetting polyimide binders. *Voprosy materialovedeniya*, 2016, no. 4, pp. 50–62.
13. *Handbook of composite materials*: in 2 books. Ed. J. Lubin. Moscow: Mashinostroenie, 1988, book. 1, 448 p.
14. Veshkin E.A. *Technologies of autoclave-free molding of low-porous polymer composite materials and large-sized structures from them*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow: VIAM, 2016, 23 p.
15. 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.
16. Tsyplakov O.G. *Scientific bases of technology of composite-fibrous materials*. Perm, 1974, pp. 36–38.
17. Kablov E.N. Materials of a new generation and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
18. Kablov E.N., Startsev V.O. Measurement and forecasting of materials samples' temperature during weathering in different climatic zones. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58.
19. Kablov E.N., Startsev V.O. Systematical analysis of the climatics influence on mechanical properties of the polymer composite materials based on domestic and foreign sources (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
20. Kobets L.P., Deev I.S. Structure formation in thermosetting binders in matrices of composite materials based on them. *Mendeleev Russian Chemical Journal of the Chemical Society*, 2010, no. 1, pp. 67–78.
21. Deev I.S., Startsev V.O., Nikishin E.F. Fractographic analysis of KMU-4L carbon fiber after 12 years of exposure to the outer surface of the International Space Station and subsequent bending tests. *Voprosy materialovedeniya*, 2015, no. 3 (83), pp. 140–149.

Информация об авторах

Курносков Артем Олегович, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM, admin@viam.ru

Петрова Алефтина Петровна, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM

Славин Андрей Вячеславович, начальник Научно-исследовательского отделения, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM, admin@viam.ru

Вавилова Мария Ивановна, заместитель начальника лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM, admin@viam.ru

Куршев Евгений Васильевич, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – VIAM, admin@viam.ru

Information about the authors

Artem O. Kurnosov, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Aleffina P. Petrova, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM

Andrey V. Slavin, Head of Scientific-Research Bureau, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Maria I. Vavilova, Deputy Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Evgeny V. Kurshev, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 05.08.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 11.08.2022.
The article was submitted 05.08.2022; approved and accepted for publication after reviewing 11.08.2022.