

Зависимость реологических характеристик эпоксидного клеевого связующего от степени гомогенности премиксной композиции

Dependence of rheological characteristics of epoxy adhesive binder on the degree of homogeneity of the premix composition

Р.К. САЛАХОВА, Е.А. ВЕШКИН, Ю.И. СУДЬИН, А.Б. ТИХООБРАЗОВ

R.K. SALAKHOVA, E.A. VESHKIN, Y.I. SUDIN, A.B. TIKHOBRZOV

Ульяновский научно-технологический центр ВИАМ – НИЦ «Курчатовский институт», Ульяновск, Россия

Ulyanovsk Scientific and Technological Center VIAM – National Research Center

untcviam@viam.ru

Представлены результаты микроскопических исследований гомогенности премиксных композиций из смеси эпоксидной смолы и отвердителя АПС-94, отличающихся способом диспергирования отвердителя. Проведены реологические и механические испытания клеевых связующих ВСК-14-1, изготовленных с использованием премиксов различной гомогенности, а также исследована реокинетика отверждения клеевых препрегов КМКС на основе вышеуказанных связующих. Установлено, что появление включений в виде белых пятен в препрегах КМКС связано с наличием в премиксе нерастворенных частиц отвердителя АПС-94 дисперсностью от 100 до 300 мкм. Экспериментально определен критерий степени гомогенности премикса, обеспечивающий получение качественного клеевого связующего и препрега на его основе (дисперсность частиц отвердителя АПС-94 не должна превышать 80 мкм).

Ключевые слова: клеевое связующее ВСК-14-1, отвердитель АПС-94, премиксная композиция, дисперсность частиц, гомогенность системы, кинетика отверждения, клеевой препрег, температура стеклования

The results of microscopic studies of the homogeneity of premix compositions from a mixture of epoxy resin and APS-94 hardener, differing in the method of dispersing the hardener, are presented. Rheological and mechanical tests of VSK-14-1 adhesive binders made using premixes of various homogeneities, were carried out, and the rheokinetics of curing of KMKS adhesive prepregs based on the above mentioned binders was studied. It has been established that the appearance of inclusions in the form of white spots in KMKS prepregs is associated with the presence in the premix of undissolved particles of the APS-94 hardener with a dispersion of 100 to 300 microns. A criterion for the degree of homogeneity of the premix was experimentally determined, ensuring the production of high-quality adhesive binder and prepreg based on it: the dispersion of particles of the APS-94 hardener should not exceed 80 microns.

Keywords: VSK-14-1 adhesive binder, APS-94 hardener, premix composition, particle dispersion, system homogeneity, curing kinetics, adhesive prepreg, glass transition temperature

DOI: 10.35164/0554-2901-2024-05-33-37

Введение

Одно из важнейших направлений современного материаловедения связано с развитием самых перспективных на сегодня материалов – композитов, поэтому двадцать первое столетие без преувеличения можно назвать веком композиционных материалов. Они окружают нас повсюду и превратились из уникальных и редких материалов, использовавшихся когда-то только в производстве специальной техники, в обычные конструкционные материалы, широко применяемые в различных отраслях промышленности [1–4]. Первая отрасль индустрии, в которой стали широко использоваться композитные материалы – аэрокосмическая, в свое время именно прогресс в космической сфере стал стимулом для развития полимерных композиционных материалов (ПКМ). С тех пор с каждым годом доля композиционных материалов в летательных аппаратах как гражданского, так и военного назначения, неуклонно растет, и на сегодняшний день в беспилотных летательных аппаратах может достигать 90% [5–9].

При разработке летательных аппаратов нового поколения возникла необходимость создания нового класса ПКМ с улучшенным комплексом свойств, сочетающего весовую эффективность, механическую прочность, долговечность и радиопрозрачность при высокой технологичности [10, 11]. Этим требованиям отвечают композиционные материалы клеевые (КМК), разработанные на основе долгоживущих клеевых препрегов ещё в конце прошлого столетия [12]. В настоящее время во ФГУП ВИАМ разработан широкий ассортимент клеевых препрегов с углеродными упрочняющими материалами (КМКУ) и со стеклянными тканями на-

полнителями (КМКС) с рабочей температурой до 175°C [13, 14]. В качестве связующего используют полимерную основу высокопрочных эпоксидных клеев, полученных путем модификации связующих расплавного типа с регулируемыми реологическими, деформационно-прочностными и физико-химическими характеристиками [15].

Реологические свойства являются важнейшими физико-химическими характеристиками веществ. В узком смысле термин «реология» иногда относят только к изучению течения вязких и пластичных тел, хотя объектами реологии являются самые разнообразные материалы: полимеры, дисперсные системы (пены, эмульсии, пасты), металлы и сплавы (особенно при высоких температурах), нефтепродукты, строительные материалы и т.д. Знание реологических свойств материалов имеет первостепенное значение для инженерных расчетов оборудования и оснастки для переработки пластмасс, для создания и совершенствования процессов переработки полимеров на стадиях уплотнения полуфабриката и формования изделия [16].

В настоящее время область реологии, изучающая кинетику реакций полимеризации, получила название «реокинетика» [17, 18]. Именно реокинетика занимается исследованием химических процессов отверждения и гелеобразования связующих, а также изучает зависимость вязкости от времени и температуры в процессе отверждения.

Эпоксидные композиции, как известно, представляют собой терморезактивные связующие, способные при определенных условиях переходить в полимеры пространственного строения с образованием

трехмерной сетки. Формирование пространственно-сшитой структуры представляет собой сложный многостадийный процесс, который до гелеобразования характеризуется изменением вязкости во времени, т.е. определенными реокинетическими закономерностями процесса отверждения. Начало этого процесса отмечается резким возрастанием вязкости системы с переходом в нетекучее состояние и образованием неплавкого нерастворимого продукта полимеризации – геля. Точка начала гелеобразования является важным технологическим параметром и фактически определяет жизнеспособность связующего [19, 20].

Одно из основных условий получения достоверных результатов измерения вязкости полимерных систем – однородность исследуемого объекта. Смысл этого требования заключается в том, что испытуемый образец должен реагировать на сдвиг одинаково по всему объёму. Если образцы являются дисперсиями или эмульсиями, то все ингредиенты, а также капли или пузырьки, должны быть существенно малы по сравнению с толщиной слоя дисперсионной среды, подвергаемой сдвигу. В таком случае дисперсию можно считать однородной [21–23]. Чтобы результаты реологических испытаний можно было корректно интерпретировать, необходимо стремиться к выполнению требования однородности исследуемых образцов.

Цель работы:

- исследование зависимости реологических характеристик клеевых связующих ВСК-14-1 от однородности предварительно полученной смеси смолы и отвердителя;
- оценка влияния однородности связующего ВСК-14-1 на теплофизические свойства полученного препрега КМКС;
- экспериментальное определение критерия степени однородности премикса (допустимый диапазон размера частиц отвердителя, распределенных в дисперсионной среде), обеспечивающего получение качественного клеевого связующего и препрега на его основе.

Материалы и методы

Объекты исследования:

1. Полиангидридный отвердитель АПС-94. Отвердитель АПС-94 представляет собой продукт конденсации себаценовой кислоты с уксусным ангидридом, используется для горячего отверждения эпоксидных смол с целью получения теплостойких и эластичных полимеров. Физико-химические показатели отвердителя АПС-94 представлены в таблице 1 (ТУ 2494–521–04872688–2016).
2. Премиксные композиции (Премикс А, Премикс Б, Премикс В), изготовленные из смеси эпоксидной смолы ЭД-22 и отвердителя АПС-94, отличающиеся способом диспергирования отвердителя АПС-94.
3. Клеевые связующие ВСК-14-1, изготовленные с использованием Премиксов А, Б, В: ВСК-14-1(А), ВСК-14-1(Б), ВСК-14-1(В);
4. Клеевые препреги КМКС – 1.80-Т10.55 на основе связующих ВСК-14-1(А), ВСК-14-1(Б), ВСК-14-1(В): КМКС (А), КМКС (Б), КМКС (В).

Следует добавить, что в состав клеевых связующих также входят премиксы других составов. Технология их изготовления предполагает после смешения компонентов проводить перетирание массы на трехвалковом станке с пошаговым изменением зазоров между валками до 0,03–0,01 мм, что обеспечивает в итоге получение однородной массы.

Исследуемые в работе премиксы А, Б, и В изготавливаются механическим перемешиванием компонентов (эпоксидная смола + АПС-94) при повышенной температуре, соответственно, их однородность зависит прежде всего от способа диспергирования частиц отвердителя АПС-94. Именно поэтому этот вид премикса и стал объектом исследования в данной статье.

Диспергирование отвердителя АПС-94 выполняли в две стадии: ударное дробление твердой массы с помощью слесарного молотка с последующим измельчением частиц в мельнице роторного типа (ножевая). Дисперсность частиц отвердителя и анализ однородности полученных премиксов исследовали на оптическом микроскопе при (25–50)-кратном увеличении путем нанесения пробы на предметные стекла микроскопа.

Кинетику процесса отверждения связующих ВСК-14-1 (А), ВСК-14-1 (Б), ВСК-14-1 (В) и препрегов на их основе исследовали

на дифференциальном сканирующем калориметре с тау-сенсором по ГОСТ 56755–2015. Условия проведения испытаний: нагрев от 25 до 320°C со скоростью 10°C/мин; охлаждение до 60°C со скоростью 15°C/мин; продувочный и защитный газ – азот (степень очистки 99,999%), скорость подачи азота – 200 мл/мин.

Таблица 1. Физико-химические характеристики отвердителя АПС-94.

№	Наименование показателей	Значение	Метод контроля
1.	Внешний вид	Твердая аморфная масса цвета топленого молока со слабым запахом уксусной кислоты	Визуальный
2.	Кислотное число, мг КОН/г	625	Прямое титрование
3.	Содержание свободных карбоксильных групп, %	8	Прямое титрование
4.	Температура плавления, °C	83	Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК)

При помощи универсальной испытательной машины проводили испытание на сдвиг клеевого соединения связующих с образцами алюминиевого сплава Д16Ат в соответствии с ГОСТ 14759–69 (температура испытания 20°C, скорость сдвига 20 мм/с). Контроль массового содержания летучих веществ в клеевых связующих – по ТУ 1-595-14-1034.

Температуру стеклования отвержденных связующих ВСК-14-1 (А), ВСК-14-1 (Б), ВСК-14-1 (В) оценивали методом пенетрации с использованием динамического механического анализатора по ГОСТ Р 56753–2015. Условия проведения испытаний: нагрев от 25 до 250°C со скоростью 5°C/мин; продувочный и защитный газ – азот, скорость 50 мл/мин (степень очистки 99,999%); частота 1 Гц; динамическое усилие – 2 Н, коэффициент нагрузки 1,1; амплитуда – 10,00 мкм.

Кажущуюся вязкость связующих определяли при помощи ротационного вискозиметра Брукфильда системы «конус-плита» при скорости сдвига 5 об/мин и температуре (64,0±0,1)°C.

Микрофотографии получали с использованием оптического микроскопа с цифровой камерой в проходящем свете.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

В таблице 2 и на рисунке 1 представлены результаты исследования технологических проб композиций связующего, полученных путем смешивания (1:1) смолы и отвердителя АПС-94, измельченного двумя способами. Микроскопическое исследование с описанием внешнего вида премиксной композиции проводилось после перемешивания массы в течение 3 часов при температуре 85°C.

Как видно из данных таблицы 2 и микрофотографий микроскопических исследований, диспергирование отвердителя АПС-94 в две стадии с применением измельчения в мельнице обеспечивает высокую степень однородности композиции связующего.

В лабораторном реакторе согласно технологическому процессу были изготовлены экспериментальные партии связующих ВСК-14-1(А), ВСК-14-1(Б), ВСК-14-1(В) на основе соответствующих Премиксов А, Б, В и проведен выходной контроль полученных партий: определение массового содержания летучих веществ, испытание на сдвиг клеевого соединения, комплекс теплофизических и реологических исследований.

Массовое содержание летучих веществ в связующих ВСК-14-1(А), ВСК-14-1(Б), ВСК-14-1(В) – не более 1,5%, прочность клеевого соединения при сдвиге – 27 МПа (при температуре 23°C) и 33 МПа (при температуре 80°C), что соответствует требованиям ТУ 1-595-14-1034–2008.

На рисунке 2 представлены кривые зависимости кажущейся вязкости связующих от времени при температуре 64,0 ± 0,1°C,

диапазон повышения вязкости для связующих ВСК-14-1 (А), ВСК-14-1 (Б), ВСК-14-1 (В) практически совпадает, независимо от вида добавленного премикса, и составляет 43,0–77,5 Па·с.

Таблица 2. Результаты исследования гомогенности композиций связующего.

№	Наименование композиции связующего	Дисперсность частиц отвердителя АПС-94	Внешний вид композиции	Результаты микроскопического исследования
1	Премикс А	Фракция 5 мм (80%), ударное дробление молотком	Прозрачная жидкость с нерастворенными частицами	Частицы отвердителя размером от 100 до 300 мкм
2	Премикс Б	Фракция 1 мм (80%), ударное дробление молотком	Прозрачная однородная жидкость без видимых включений	Частицы отвердителя размером от 30 мкм до 80 мкм
3	Премикс В	Фракция 0,2 мм (80 %), ударное дробление молотком, затем измельчение в мельнице	Прозрачная однородная жидкость без видимых включений	Частицы отвердителя размером от 10 мкм до 20 мкм

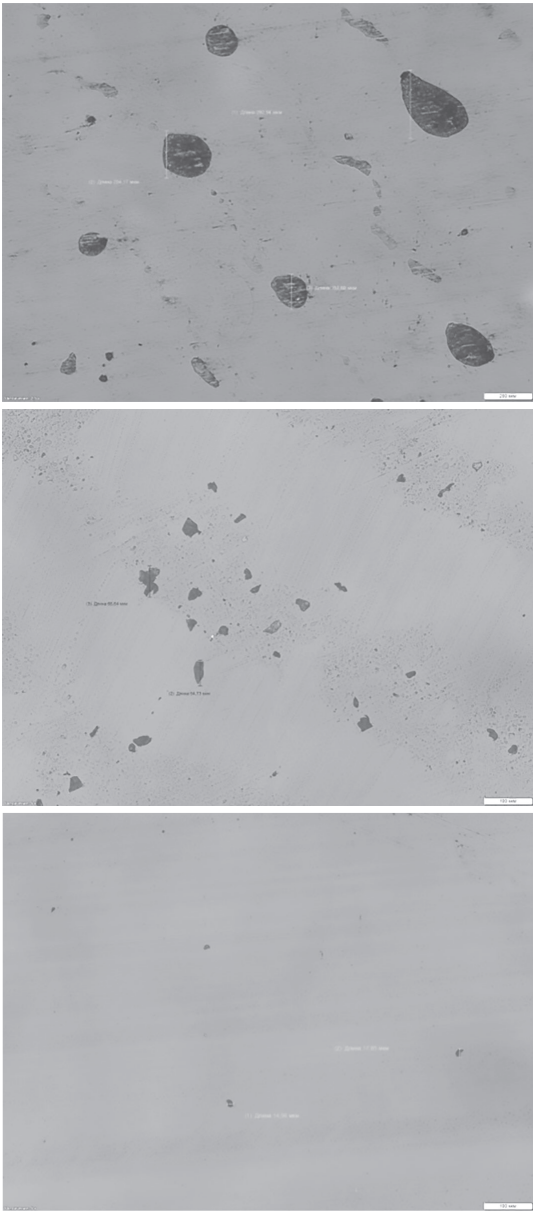


Рис. 1. Результаты микроскопического исследования гомогенности композиций связующего: а – Премикс А, ×25; б – Премикс Б, ×50; в – Премикс В, ×50.

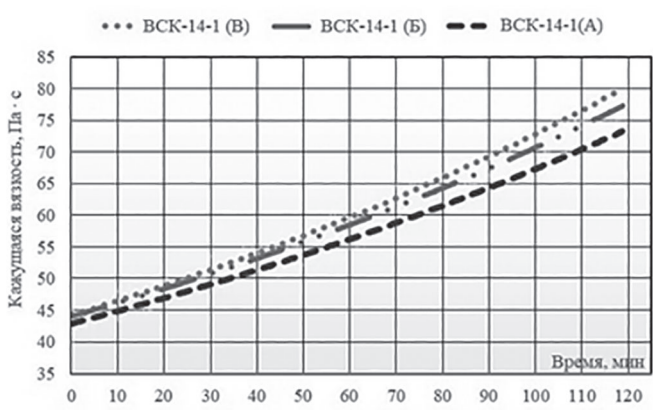


Рис. 2. Кажущаяся вязкость связующих при температуре 64 ± 0,1°С.

Результаты исследования кинетики процессов отверждения связующих приведены на рисунке 3.

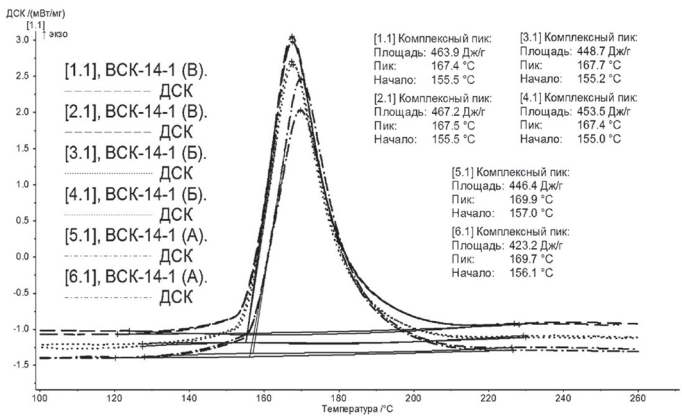


Рис. 3. Зависимость удельной тепловой мощности от температуры для связующих ВСК-14-1 (А), ВСК-14-1 (Б), ВСК-14-1 (В).

По результатам проведенных испытаний видно, что тепловой эффект реакции отверждения экспериментальных связующих незначительно увеличивается при переходе от связующего с Премиксом А к связующему с Премиксом В (на 7%), что как раз и объясняется повышением степени гомогенности испытуемых проб связующего. Показатели термограмм ДСК связующих (температурный интервал реакции отверждения, температура максимума пика) практически совпадают. Кривые ДСК, отвечающие ВСК-14-1(В) и ВСК-14-1(Б), образуют плотный пучок на графике зависимости удельной тепловой мощности от температуры. Для связующего ВСК-14-1 (А) наблюдается незначительное смещение температуры начала отверждения вправо (примерно на 2°С).

С применением динамического механического анализатора методом пенетрации определена температура стеклования экспериментальных партий клеевых связующих (рис. 4). Наблюдается незначительное увеличение температуры стеклования (примерно на 2°С) при переходе от связующего с Премиксом А к связующему с премиксом В.

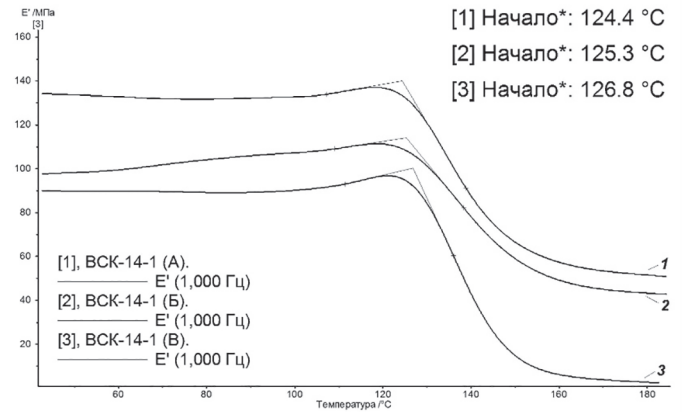


Рис. 4. Кривые динамического механического анализа зависимости модуля упругости от температуры.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно резюмировать, что степень гомогенности премиксной компо-

зиции, зависящая от способа диспергирования отвердителя АПС-94, практически не оказывает влияния на реологические и теплофизические характеристики клеевого связующего марки ВСК-14-1.

На пропиточной машине «РУСИС-4» с использованием онлайн-технологии на основе вышеуказанных связующих были изготовлены экспериментальные партии клеевых препрегов КМКС (А), КМКС (Б), КМКС (В). При визуальном контроле на образцах партии препрега КМКС (А) обнаружены включения в виде белых и беловатых (тускло-белых) пятен размером не более 5 мм. Внешний вид пятен представлен на рисунке 5.



Рис. 5. Фото внешнего вида пятен на поверхности препрега КМКС (А).

При этом на поверхности образцов препрегов КМКС (Б), КМКС (В) каких-либо изъянов, видимых невооруженным глазом, не обнаружено. Данный факт свидетельствует о том, что появление белых пятен вызвано наличием в связующем микровключений нерастворенных частиц отвердителя АПС-94. Отсюда появилась необходимость исследовать и сравнить реакционную способность препрега с включениями – КМКС (А) и продуктов без отклонений – КМКС (Б), КМКС (В). Термограммы ДСК с температурными характеристиками реакций отверждения образцов препрегов представлены на рисунке 6.

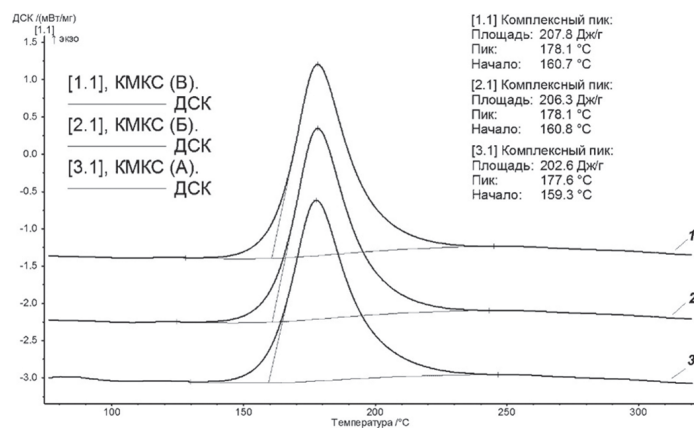


Рис. 6. Результаты исследования кинетики реакций отверждения образцов препрегов КМКС.

Совокупность полученных данных, а именно идентичность полученных ДСК кривых, соответствующих реакциям отверждения препрегов, и результаты визуально-оптического исследования их поверхностей позволяют предположить, что включения на поверхности препрега КМКС (А) в виде белых пятен не являются браковочным признаком. Но следует отметить, что в местах локализации нерастворенных частиц отвердителя возникает вероятность появления непроклеев, вызванных отсутствием адгезионной связи на границе «матрица – волокно». При этом можно утверждать, что наличие включений с размерами, соизмеримыми с зазором валов пропиточной машины, не критично и не повлечет появление видимых несовершенств в результате растворения частиц отвердителя в процессе пропитки стеклоткани.

Для оценки характера вышеописанных белых пятен, их классификации по дефектной принадлежности [24] и оценки допустимого размера частиц в полимерной матрице необходимо провести дальнейшие сравнительные исследования механических, физико-химических и теплофизических свойств стеклопластиков, изготовленных из экспериментальных партий препрегов КМКС (А), КМКС (Б), КМКС (В).

Выводы

Наличие в премиксе нерастворенных частиц отвердителя АПС-94 размерами от 10 до 300 мкм не оказывает влияния на реологические свойства связующего ВСК-14-1 и препрега на его основе.

Появление включений в виде белых пятен в препрегах КМКС, изготовленных на основе связующего ВСК-14-1, связано с наличием в премиксе нерастворимых частиц отвердителя АПС-94 с размерами от 100 до 300 мкм.

Для исключения возможности появления в препреге КМКС видимых белых пятен необходимо дробить (измельчать) массу отвердителя АПС-94 до получения частиц размером не более 1 мм. Рекомендуется проводить измельчение дробленого отвердителя в мельнице до порошкообразного состояния и проводить экспресс-анализ полученного премикса на однородность состава (дисперсность частиц не должна превышать 80 мкм).

Литература

1. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра. // Металлы Евразии. 2015. №1. С. 36–39.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года. // Авиационные материалы и технологии. 2012. N S. С. 7–17.
3. Каблов Е.Н. К 80-летию ВИАМа. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78, №5. С.79–82.
4. Салахова Р.К., Тихообразов А.Б., Смирнова Т.Б., Кирилин С.Г. Химико-гальваническая металлизация угле- и стеклопластика. // Гальванотехника и обработка поверхности. 2020. Т. 28, N 3. С. 13–21.
5. Мишкин С.И. Применение углепластиков в конструкциях беспилотных аппаратов (обзор). // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2022. №5 (111). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. (дата обращения 29.09.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-87-95.
6. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов. // Авиационные материалы и технологии. 2017. N S. С. 344–348.
7. Бабин А.Н. Связующие для полимерных композиционных материалов нового поколения. // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №4. Ст. 5 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 18.10.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-40-50.
8. Салахова Р.К., Тихообразов А.Б., Смирнова Т.Б., Кирилин С.Г. Никелирование угле- и стеклопластика в целях повышения эрозионной стойкости конструкций из ПКМ. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2021. Т. 17. №5 (197). С. 221–227.
9. Загора А.Г., Ткачук А.И., Терехов И.В., Мухаметов Р.Р. Методы химической модификации эпоксидных олигомеров (обзор). // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн., 2021. N 7 (101). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. (дата обращения 02.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-7-73-85.
10. 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.
11. Куцевич К.Е., Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф., Тюменева Е.Ю. Клеевые препреги – перспективные материалы для деталей и агрегатов из ПКМ. // Авиационные материалы и технологии. 2017. N S. С. 379–387. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-64-70.
12. Куцевич К.Е., Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф. Свойства и назначение полимерных композиционных материалов на основе клеевых препрегов. // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №8. (44). С. 52–59 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 26.10.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-7-7.

13. Петрова А.П., Деменьева Л.А., Лукина Н.Ф., Чурсова Л.В. Клеевые связующие для полимерных композиционных материалов на угле- и стеклонеполнителях. // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №9. С. 86–93. URL: <http://www.viam-works.ru>. (дата обращения 26.10.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-9-11-11.
14. Антипов В.В., Котова Е.В., Серебренникова Н.Ю., Петрова А.П. Клеевые связующие и клеевые препреги для алюмополимерных композиционных материалов. // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №5 (65). С. 44–54. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 02.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-44-54.
15. 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.
16. Амиров Р.Р., Андрианова К.А., Хасанов Р.Р., Петрова А.А. и др. Исследование реологических свойств эпоксидных олигомеров в широком диапазоне температур. // Бутлеровские сообщения. 2013. Т. 33, №2. С. 69–73.
17. Пахомов К.С., Антипов Ю.В., Симонов-Емельянов И.Д. Вязкостные характеристики и реокинетика эпоксидного олигомера с активным разбавителем. // Пластические массы. 2016. №1–2. С. 12–13.
18. Куличихин С.Г., Горбунова И.Ю. Кербер М.Л., Самардуков Е.В. Реокинетика отверждения эпоксисаминной системы в области стеклования. // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. 1995. Т.37, №3. С. 533–536.
19. Онучин Д.В., Бригаднов К.А., Горбунова И.Ю., Сиротин И.С. и др. Реокинетика отверждения эпоксидного олигомера ЭД 20, модифицированного эпоксифосфазенами. // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. 2015. Т. 57. №5. С. 322–327.
20. Углова Т.К., Ходакова Н.Н., Блазнов А.Н., Самойленко В.В. и др. Вязкостные свойства и реокинетика эпоксидангидридных связующих намоточного назначения // Ползуновский вестник. №4 Т. 1. 2016. С. 200–203.
21. Гусева М.А. Использование реологического метода испытаний при разработке полимерных материалов различного назначения. // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн., 2018. №11 (71). С. 35–44 URL: <http://www.viam-works.ru>. (дата обращения 02.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-35-44.
22. Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии. М.: КолосС. 2003. 312 с.
23. Чанг Дей Хан. Реология в процессах переработки полимеров. М.: Химия. 1979. 368 с.
24. Диков И.А., Яковлева С.И., Бойчук А.С., Чертищев В.Ю. Классификация дефектов в 2D-армированных полимерных композиционных материалах (обзор). // Труды ВИАМ электрон. науч.-технич. журн. 2023. №3 (121). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. (дата обращения 20.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-67-83.