

Научная статья

УДК 678.747.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-29-38

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННОГО РЕЖИМА ОТВЕРЖДЕНИЯ ПРЕПРЕГА УГЛЕПЛАСТИКА КМКУ-6.80.SYT49(S) НА ОСНОВЕ КЛЕЕВОГО СВЯЗУЮЩЕГО ПОНИЖЕННОЙ ГОРЮЧЕСТИ

А.И. Старков¹, К.Е. Куцевич¹, А.П. Петрова¹, Н.В. Антюфеева¹

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

Аннотация. Методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) исследована кинетика отверждения клеевого связующего в препреге. Выбрана схема реакции отверждения и определены кинетические параметры реакции отверждения для каждой элементарной стадии процесса. Построены обобщенные кинетические модели реакции отверждения на основе экспериментальных данных, полученных методом ДСК. На основе экспериментальных и расчетных данных подобраны режимы отверждения связующего в препреге. Приведены данные о физико-механических свойствах образцов углепластика ВКУ-59.

Ключевые слова: клеевое связующее пониженной горючести, клеевой препрег, отверждение, термический анализ, кинетические параметры, прочностные характеристики

Для цитирования: Старков А.И., Куцевич К.Е., Петрова А.П., Антюфеева Н.В. К вопросу о выборе температурно-временного режима отверждения препрега углепластика КМКУ-6.80.SYT49(S) на основе клеевого связующего пониженной горючести // Труды ВИАМ. 2023. № 3 (121). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-29-38.

Scientific article

DEVELOPMENT OF TEMPERATURE AND TIME CURING REGIME FOR PREPREGS BASED ON ADHESIVE BINDER WITH REDUCED FLAMMABILITY

A.I. Starkov¹, K.E. Kutsevich¹, A.P. Petrova¹, N.V. Antufeeva¹

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 kinetics of curing of adhesive prepreg binders was investigated by differential scanning calorimetry (DSC). The most adequate scheme of the curing reaction was selected and the kinetic parameters of the curing reaction for each elementary stage of the process were determined. Generalized kinetic models of the curing reaction are constructed on the basis of experimental data obtained by the DSC method. On the basis of experimental and calculated data, the curing modes of the binder in the prepreg are selected. Data on physical and mechanical properties of samples carbon fiber plastic BCU-59 are given.

Keywords: low-flammability adhesive binder, adhesive prepreg, curing, thermal analysis, kinetic parameters, strength characteristics

For citation: Starkov A.I., Kutsevich K.E., Petrova A.P., Antufeeva N.V. Development of temperature and time curing regime for prepregs based on adhesive binder with reduced flammability. *Trudy VIAM*, 2023, no. 3 (121), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-29-38.

Введение

Современные подходы к обеспечению минимальной массы элементов конструкции авиационной техники без снижения заложенных или планируемых ресурсов летной техники тесно связаны с увеличением в них доли полимерных композиционных материалов (ПКМ). Внедрение композиционных материалов с высокими упруго-прочностными свойствами и жесткостью позволяет улучшить весовые характеристики и обеспечить запас массы для увеличения дальности полета и полезной весовой нагрузки и, как следствие, обеспечить снижение расхода топлива. Современные ПКМ позволяют успешно проводить замену традиционных сталей и сплавов с высокой долей использования в зависимости от изделия.

В свою очередь, развитие этого направления потребовало разработки принципиально нового оборудования, постоянного совершенствования технологий, создания автоматизированных комплексов по переработке ПКМ в изделия. В настоящее время ПКМ, изготавливаемые с использованием современных технологических процессов переработки, способны обеспечивать все возрастающие требования к упруго-прочностным свойствам материалов и их эксплуатационной стабильности, которые необходимы для успешной работоспособности конструкций.

Качество и эксплуатационная надежность изделий из ПКМ зависят от свойств исходных компонентов и полуфабрикатов (препрегов, премиксов), используемых при их изготовлении [1–5].

В то же время распространение компьютерной техники значительно упростило выполнение вычислительных задач при обработке экспериментальных данных, а также при выполнении цифровой визуализации экспериментальных данных и результатов кинетических расчетов, используемых в качестве базовых при выборе технологических параметров процессов переработки полуфабрикатов в изделия [6, 7].

На фоне ускоренного развития экспериментальной и вычислительной техники одним из наиболее эффективных средств, позволяющих исследовать свойства материалов и процессов, протекающих в них при изменении температуры, являются методы термического анализа. Производимые в настоящее время ведущими мировыми компаниями и постоянно совершенствующиеся исследовательские комплексы выполняют функции термоаналитических мини-лабораторий и широко используются как при разработке новых материалов, так и для контроля их качества в различных областях промышленного производства.

Разнообразие современных методов термического анализа позволяет проводить комплексные исследования ПКМ в широком интервале температур. Современное оборудование, предусматривающее автоматизированный сбор и обработку полученных результатов, позволяет расширить методические возможности термического анализа как при исследовании ПКМ, так и при контроле качества получаемых материалов [8].

Термореактивное связующее является основным активным компонентом, содержащимся в составе применяемого в производстве полуфабриката (препрега), и определяет как технологические свойства исследуемого полуфабриката, так и уровень эксплуатационных характеристик отвержденного материала в составе изделия, поэтому процесс его отверждения в условиях формования изделия заслуживает особого внимания [9, 10].

Реализация максимальной тепло- и термостойкости густосетчатых полимеров, полученных отверждением термореактивных смол, во многом определяется выбором температурно-временных режимов формирования препрега. Одним из наиболее часто используемых критериев для выбора температурно-временного режима отверждения является равномерность тепловыделения, что для полимер-олигомерных термореактивных составов является очень важным из-за их низких теплопроводности и

теплоемкости, а также высокого тепловыделения при полимеризации. Например, температурно-временной режим для тонкого слоя уже не подходит для изделий толщиной в несколько десятков миллиметров, так как приводит к самопроизвольному и неконтролируемому нагреву, сопровождающемуся интенсивным выделением низкомолекулярных продуктов и полной потерей эксплуатационных свойств [11–13]. Одним из наиболее распространенных методов для выбора температурно-временного режима, где в качестве критерия используется равномерность тепловыделения, являются термокинетические расчеты с использованием метода дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) [14, 15]. При использовании термокинетических расчетов образец отверждают в ячейке ДСК в изотермических условиях или при постоянном нагревании с постоянными скоростями, при этом основным приближением данного подхода является пропорциональность скорости химической реакции отверждения и теплового потока при отверждении [16–18]. Полученные результаты могут быть использованы как для расчетов параметров кинетических уравнений реакции (энергия активации, порядок реакции, предэкспоненциальный множитель), так и для построения и решения сложного кинетического уравнения, включающего в себя различные параллельные и последовательные химические процессы [19–22].

Материалы и методы

Основным методом, используемым в работе для получения экспериментальных данных для кинетических расчетов, стал метод ДСК. Этот метод с наибольшей степенью надежности может быть использован для решения поставленной задачи при исследовании процессов отверждения термореактивных связующих на основе эпоксидных, полиэфирных, бисмалеинимидных и других смол, сопровождающихся четким и хорошо воспроизводимым (как в рассматриваемом случае) экзотермическим тепловым эффектом [23–25].

Экспериментальные данные для расчетов и построения кинетической модели реакции отверждения получены в единой серии экспериментов на приборе DSC-1 компании «Меттлер Толодо» (Швейцария).

Проведены экспериментальные исследования образцов из клеевого препрега марки КМКУ-6.80.SYT49(S) для углепластика ВКУ-59. Препреги сделаны на основе клеевого связующего ВСК-14-6 и высокопрочного углеродного жгутового наполнителя марки SYT49(S)-12K. Исследования проводили методом ДСК при разных скоростях нагрева: 5; 10 и 20 °С/мин в интервале температур – от 25 до 280 °С, в воздушной среде, в перфорированных алюминиевых тиглях объемом 40 мл. Для проведения кинетических расчетов использовали программное обеспечение фирмы Netzsch-Thermokinetics. Расчеты проводили с использованием математической модели, которая характеризуется уравнением Аррениуса:

$$\frac{dc}{dt} = -A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \cdot f(c, p), \quad (1)$$

$$f(c, p) = c^n \cdot p^a,$$

где $f(c, p)$ – функция, определяющая вид кинетического уравнения; A – предэкспоненциальный множитель; E_a – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; T – температура; n – порядок реакции; c – концентрация исходного вещества; p – концентрация продукта; a – показатель степени.

При определении свойств образцов углепластика использована следующая нормативная документация:

– по ГОСТ Р 56755–2015 – по кривым реакции отверждения характеристические температуры и продолжительность реакции, а также энтальпия и степень превращения;

- по ГОСТ Р 56785–2015 – предел прочности, модуль упругости и относительное удлинение при растяжении;
- по ГОСТ 33519–2015 – предел прочности при сжатии;
- по ГОСТ 56810–2015 – предел прочности при поперечном изгибе;
- по ГОСТ 32659–2014 – предел прочности при межслойном сдвиге;
- по ГОСТ 15139–73 – плотность.

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

Результаты и обсуждение

В результате исследований методом ДСК процессов отверждения экспериментальных композиций связующего в образцах препрегов углепластиков выбрана наиболее подходящая реакция отверждения.

Для данной реакции рассчитаны кинетические параметры: предэкспоненциальный множитель A (с^{-1}), энергия активации E_a (кДж/моль), значение порядка реакции n и показатель автоускорения.

Результаты математического моделирования и расчетов приведены на рис. 1–3 и в табл. 1.

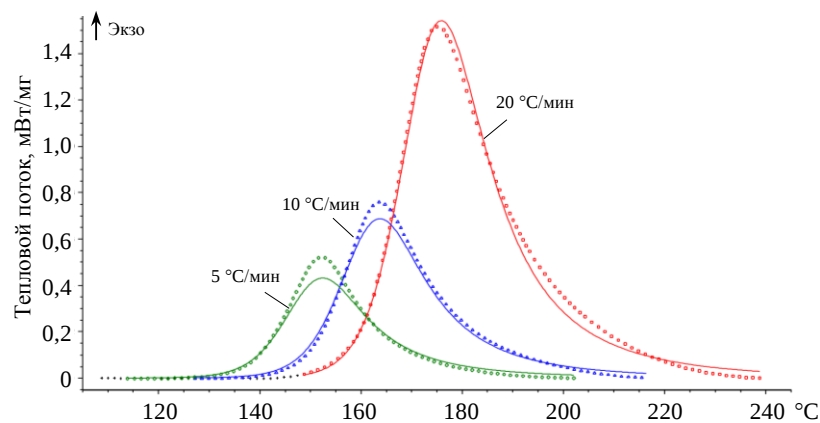


Рис. 1. Кривые ДСК реакции отверждения образцов клеевого препрега марки КМКУ-6.80.SYT49(S) при разных скоростях нагрева (точки – эксперимент; сплошная линия – расчет)

Сходимость экспериментальных кривых с расчетными кривыми (рис. 1) свидетельствует об адекватности выбранной модели отверждения экспериментальной композиции связующего в препреге.

В табл. 1 приведены кинетические параметры отверждения клеевого препрега марки КМКУ-6.80.SYT49(S) для углепластика ВКУ-59.

С учетом того, что в исследованных в данной статье связующем и клеевых препрегах использована бромсодержащая эпоксидная смола, представляет интерес сравнение полученные данные с аналогичными данными для материалов, не содержащих в молекулах брома.

По результатам проведенных кинетических исследований процессов отверждения связующего в препрегах проведен выбор режимов с целью получения контрольных образцов углепластиков с данной степенью отверждения. Расчет проводили с использованием универсальной программы Kinetics 3 фирмы Netzsch. В результате проведенных расчетов установлено, что процессы отверждения образцов на основе связующего марки ВСК-14-6 подчиняются кинетической модели Праута–Томкинса – реакции n -го порядка с автоускорением. Пример расчета представлен на рис. 1 и 2.

Таблица 1

**Кинетические параметры реакции отверждения (две стадии)
образцов клеевого препрега для углепластика ВКУ-59**

Показатели	Значения показателей
Предэкспоненциальный множитель: A_1, c^{-1} $\log(A_1, c^{-1})$	81,9974 1,9138
Энергия активации $E_{a1}, \text{кДж/моль}$	38,1915
Порядок реакции n_1	0,8811
Константа автокатализа a_1	0,7503
Предэкспоненциальный множитель: A_2, c^{-1} $\log(A_2, c^{-1})$	0,0166 -1,7788
Энергия активации $E_{a2}, \text{кДж/моль}$	0,1122
Порядок реакции n_2	1,3896
Константа автокатализа a_2	0,8458

На основании рассчитанных математических моделей процесса отверждения образцов препрега предложен температурно-временной режим отверждения клеевого препрега марки КМКУ-6.80.SYT49(S). Режим отверждения показан на рис. 2 и 3.

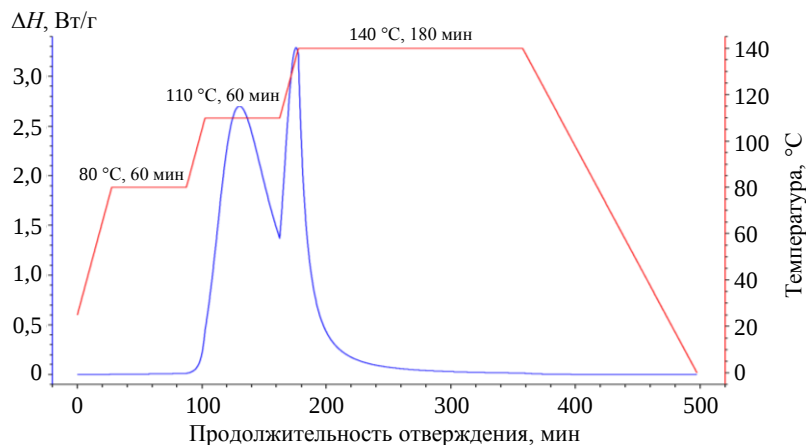


Рис. 2. Процесс тепловыделения (ΔH) реакции отверждения клеевого связующего ВСК-14-6 в препреге углепластика КМКУ-6.80.SYT49(S)

Данный температурный режим отверждения выбран по аналогии с ранее использованным режимом отверждения для клеевого связующего ВСК-14-1 в клеевом препреге марки КМКУ-1.80.Э0,1, но без галогенсодержащего антипирена, а также опробован для получения материалов с высокими физико-механическими характеристиками.

Как видно из данных рис. 2, процесс отверждения клеевого связующего в клеевом препреге марки КМКУ-6.80.SYT49(S) проходит в две стадии и заканчивается после выдержки препрега при температуре 140 °C в течение 180 мин. Подобранные температурно-временные условия для формирования клеевого препрега марки КМКУ-6.80.SYT49(S) до степени его отверждения ~99 %. Ступенчатый характер режима, длительный прогрев и медленная скорость охлаждения после окончания отверждения обусловлены необходимостью выдержки материала при повышенных температурах для равномерного прогрева по всему объему изделия и минимизации в нем внутренних напряжений. Кроме того, данный режим обусловлен возможностями большинства моделей технологического оборудования (автоклавов), используемого на предприятиях отрасли для изготовления ПКМ на основе клеевого препрега марки КМКУ-1.80.Э0,1.

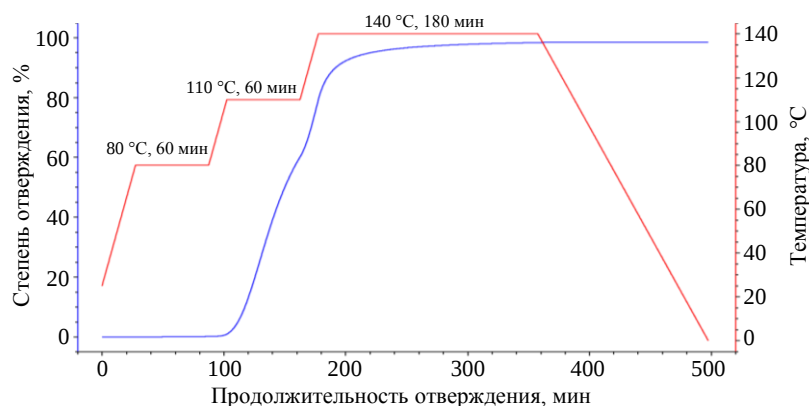


Рис. 3. Степень отверждения клеевого связующего ВСК-14-6 в клеевом препреге марки КМКУ-6.80.SYT49(S) для углепластика ВКУ-59

Как видно из данных рис. 3, степень отверждения клеевого препрега марки КМКУ-6.80.SYT49(S) достигает 98,7 %, что подтверждает корректность смоделированного режима.

По разработанному режиму отверждения автоклавным методом формования изготовлены плиты из углепластика ВКУ-59 на основе клеевого препрега марки КМКУ-6.80.SYT49(S) (ТУ 1-595-11-1775–2018) и проведено исследование их свойств в сравнении со свойствами плит из разработанного ранее углепластика на основе клеевого препрега марки КМКУ-1.80.Э0,1 с теплостойкостью 80 °C, которые представлены в табл. 2. Пластики изготовлены по одному и тому же режиму отверждения.

Таблица 2

Сравнительные свойства углепластика ВКУ-59 со схемой армирования [0]_n при температуре испытания 20 и 80 °C и аналога – на основе препрега КМКУ-1.80.Э0,1

Свойства	Значение свойств для материала				Квоты пре- восходства, %
	ВКУ-59		КМКУ-1.80.Э0,1		
	при температуре испытания, °С				
	20	80	20	80	20
Предел прочности, МПа:					
при растяжении (ГОСТ Р 56785–2015)	2510	2327	833	666	В 3 раза
при сжатии (ГОСТ 33519–2015)	1027	825	892	647	
при поперечном изгибе (ГОСТ 56810–2015)	1824	1180	1130	1000	
при межслойном сдвиге (ГОСТ 32659–2014)	80	55	83,3	55,9	
Модуль упругости:					
при растяжении, ГПа (ГОСТ Р 56785–2015)	119	112	98	82	21
при сжатии, ГПа (ГОСТ 33519–2015)	127	115	94,5	84,3	35
при поперечном изгибе, МПа (ГОСТ 56810–2015)	120	101	71,5	66,6	68
Плотность углепластика, г/см ³ (ГОСТ 15139–73)	1,63		1,43		–
Теплостойкость, °С	80				

Анализ полученных результатов исследования комплекса физико-механических свойств образцов из углепластика ВКУ-59, отвержденного по разработанному режиму, показывает более высокие физико-механические характеристики по сравнению с аналогом на основе клеевого препрега марки КМКУ-1.80.Э0,1 (табл. 2). Так, сохранение прочности при растяжении и сжатии углепластика ВКУ-59 на основе клеевого препрега марки КМКУ-6.80.SYT49(S) при температуре испытания 80 °C составило от 60 до 93 % (в зависимости от вида и условий испытаний), что свидетельствует о его теплостойкости при температуре 80 °C.

Сохранение значений прочности при растяжении образцов из углепластика ВКУ-59 при температуре испытаний 20 °С составило от 86 до 93 %, квота превосходства над материалом-аналогом составила больше трех раз. Сохранение значений прочности при сжатии образцов из углепластика ВКУ-59 при температуре испытаний 80 °С составило от 60 до 80 % относительно значения при 20 °С, квота превосходства над материалом-аналогом составила 15 %. Сохранение значений прочности при изгибе образцов углепластика ВКУ-59 при температуре испытаний 80 °С составило 65 % относительно значения при 20 °С, квота превосходства над материалом-аналогом составила 61 %. Сохранение значений прочности при межслойном сдвиге образцов из углепластика ВКУ-59 при температуре испытаний 80 °С составило 69 % относительно значения при 20 °С.

По результатам исследований прочностных показателей установлено, что разработанный режим отверждения эпоксидной матрицы связующего ВСК-14-6 с углеродным жгутовым наполнителем марки SYT49(S)-12К показал высокий уровень сохранения прочностных свойств при температуре испытаний 80 °С.

Заключения

Таким образом, на основе термоаналитических исследований и кинетических расчетов показано, что механизм процесса отверждения препрега углепластика КМКУ-6.80.SYT49(S) является двухстадийной реакцией. Для каждой стадии определены кинетические параметры. На основе рассчитанных кинетических параметров подобран режим формования плит углепластиков, определена степень полимеризации связующего в углепластике в процессе отверждения. Данный режим опробован на технологическом оборудовании.

Клеевое эпоксидное связующее с пониженной горючестью и дымообразующей способностью образует при отверждении при температуре 100–140 °С полимерную матрицу с высокими прочностными свойствами.

Наличие в составе клеевого связующего латентного отвердителя аминного типа с двумя катализаторами отверждения эпоксидных олигомеров снижает температуру отверждения полимерной матрицы до 140 °С и в сочетании с высокой жизнеспособностью позволяет получать клеевые препреги со сроком хранения не менее 6 мес при температуре от 0 до 8 °С, что существенно превосходит ближайшие аналоги импортных производителей.

Установлено, что предложенный режим отверждения эпоксидной матрицы связующего ВСК-14-6 с углеродным жгутовым наполнителем марки SYT49(S)-12К позволяет получить ПКМ с высоким уровнем сохранения прочностных свойств при температуре испытаний 80 °С.

Список источников

1. 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.
2. 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.
3. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Иноземцев А.А. Влагонасыщение конструктивно-подобных элементов из полимерных композиционных материалов в открытых климатических условиях с наложением термоциклов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 2 (47). С. 56–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-56-68.
4. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8–18.

5. Старков А.И., Куцевич К.Е., Тюменева Т.Ю., Петрова А.П. Клеевые препреги пониженной горючести, предназначенные для изготовления интегральных и трехслойных сотовых конструкций авиационной техники // Труды ВИАМ. 2022. № 5 (111). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.01.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-41-52.
6. Постнов В.И., Качура С.М., Вешкин Е.А. Моделирование процесса отверждения полимерного связующего и изменения микротвердости в его объеме // Труды ВИАМ. 2021. № 4 (98). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-92-99.
7. Антюфеева Н.В., Журавлева П.Л., Алексахин В.М., Куцевич К.Е. Влияние степени отверждения связующего на физико-механические свойства углепластика и микроструктуру межфазного слоя углеродное волокно/матрица // Клеи. Герметики. Технологии. 2014. № 12. С. 26–30.
8. Антюфеева Н.В., Алексахин В.М., Столянков Ю.В. Определение степени отверждения ПКМ методами термического анализа // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 3 (36). С. 79–83. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-79-83.
9. Куцевич К.Е., Алексахин В.М., Петрова А.П., Антюфеева Н.В. Исследование кинетики реакций отверждения клеевых связующих // Клеи. Герметики. Технологии. 2014. № 11. С. 27–31.
10. 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.
11. Алексахин В.М., Большаков В.А., Соловьева Н.А., Раскутин А.Е. Влияние армирующих наполнителей на отверждение связующего для теплостойких полимерных композиционных материалов // Пластические массы. 2013. № 10. С. 49–54.
12. Железина Г.Ф., Гуляев И.Н., Соловьева Н.А. Арамидные органопластики нового поколения для авиационных конструкций // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 368–378. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-5-368-378.
13. Железина Г.Ф., Войнов С.И., Каримбаев Т.Д., Чернышев А.А. Арамидные органопластики для корпусов вентиляторов авиационных двигателей // Вопросы материаловедения. 2017. № 32 (90). С. 153–165.
14. Чурсова Л.В., Ткачук А.И., Панина Н.Н., Гуревич Я.М., Бабин А.Н., Малков Г.В. Исследование механизма отверждения системы дигиандиамид – эпоксициановый олигомер в присутствии несимметричной мочевины // Клеи. Герметики. Технологии. 2014. № 8. С. 2–12.
15. Grenier-Loustalot M.F., Bente M.P., Grenier Ph. Reactivite du dicyandiamide vis a vis des groupements et N-epoxide-1. Mechanism reactionnel // European Polymer Journal. 1991. Vol. 27. No. 11. P. 1201–1216.
16. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов: справочник. Л.: Энергия, 1974. 264 с.
17. Баринов Д.Я. К выбору оптимальной толщины образца углепластика при измерениях теплопроводности импульсным методом // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 2 (67). Ст. 12. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 19.01.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-131-140.
18. Гуляев А.И., Медведев П.Н., Сбитнева С.В., Петров А.А. Экспериментальное исследование по оценке адгезионной прочности «волокно–матрица» в углепластике на основе эпоксидного связующего, модифицированного полисульфоном // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 4 (57). С. 80–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-80-86.
19. Морозов С.В., Павлов Н.А., Зенин М.Н. Исследование влияния состава эпоксидного связующего на его физико-механические характеристики // Ползуновский вестник. 2020. № 1. С. 140–144. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2020.01.027.
20. Водовозов Г.А., Осипчик В.С., Мараховский К.М., Папина С.Н., Ключников С.А. Модификация эпоксисодержащего связующего для создания высокопрочных композитов // Успехи в химии и химической технологии. 2015. Т. XXIX. № 10. С. 20–22.
21. Малаховский С.С., Панафидникова А.Н., Костромина Н.В., Осипчик В.С. Углепластики в современном мире: их свойства и применения // Успехи в химии и химической технологии. 2019. Т. XXXIII. № 6. С. 62–64.
22. Чуцкова Е.Ю., Алексахин В.М., Баринов Д.Я., Дементьева Л.А. Опыт применения дифференциальной сканирующей калориметрии для исследования кинетических закономерностей отверждения эпоксидного клея ВК-36Р // Труды ВИАМ. 2015. № 1. Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.01.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-12-12.

23. Зеленина И.В., Гуляев И.Н., Кучеровский А.И., Мухаметов Р.Р. Термостойкие углепластики для рабочего колеса центробежного компрессора // Труды ВИАМ. 2016. № 2 (38). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.01.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-8-8.
24. Алексашин В.М. Особенности взаимодействия компонентов и влияние их на процессы и технологию формирования эпоксидных органопластиков: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2001. 28 с.
25. Федосеев М.С., Державинская Л.Ф., Ощепкова Т.Е. и др. Влияние химической природы эпоксидных связующих на некоторые свойства отвержденных композиций в процессе термостарения // Клеи. Герметики. Технологии. 2012. № 7. С. 8–12.

References

1. 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 tekhnologii*, 2016, vol. 2, no. 2, pp. 37–42.
2. Kablov E.N., Startsev V.O. Systematical analysis of the climatic influence on mechanical properties of the polymer composite materials based on domestic and foreign sources (review). *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
3. Kablov E.N., Startsev V.O., Inozemtsev A.A. The moisture absorption of structurally similar samples from polymer composite materials in open climatic conditions with application of thermal spikes. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2017, no. 2 (47), pp. 56–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-56-68.
4. Kablov E.N. What is the future to be made of? Materials of a new generation, technologies for their creation and processing - the basis of innovation. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
5. Starkov A.I., Kutsevich K.E., Tyumeneva T.Yu., Petrova A.P. Low-combustibility adhesive pre-pregs designed for the manufacture of integral and three-layer honeycomb structures aircraft technology. *Trudy VIAM*, 2022, no. 5 (111), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 19, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-41-52.
6. Postnov V.I., Kachura S.M., Veshkin E.A. Modeling of the curing process of a polymer resin and changes in microhardness in its volume. *Trudy VIAM*, 2021, no. 4 (98), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 09, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-92-99.
7. Antyufeeva N.V., Zhuravleva P.L., Aleksashin V.M., Kutsevich K.E. Influence of the degree of curing of the binder on the physical and mechanical properties of carbon fiber and the microstructure of the interfacial layer carbon fiber/matrix. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2014, no. 12, pp. 26–30.
8. Antyufeeva N.V., Aleksashin V.M., Stolyankov Yu.V. Polymer composite curing degree evaluation by thermal analysis test methods. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 3 (36), pp. 79–83. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-79-83.
9. Kutsevich K.E., Aleksashin V.M., Petrova A.P., Antyufeeva N.V. Investigation of the kinetics of curing reactions of adhesive binders. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2014, no. 11, pp. 27–31.
10. 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 tekhnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
11. Aleksashin V.M., Bolshakov V.A., Solovieva N.A., Raskutin A.E. Influence of reinforcing fillers on the curing of a binder for heat-resistant polymer composite materials. *Plasticheskiye massy*, 2013, no. 10, pp. 49–54.
12. Zhelezina G.F., Gulyaev I.N., Soloveva N.A. Aramide organic plastics of new generation for aviation designs. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2017, no. S, pp. 368–378. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-368-378.
13. Zhelezina G.F., Voinov S.I., Karimbaev T.D., Chernyshev A.A. Aramid organoplastics for aircraft engine fan casings. *Voprosy materialovedeniya*, 2017, no. 32 (90), pp. 153–165.
14. Chursova L.V., Tkachuk A.I., Panina N.N., Gurevich Ya.M., Babin A.N., Malkov G.V. Investigation of the curing mechanism of the system dicyandiamide – epoxydian oligomer in the presence of unsymmetrical urea. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2014, no. 8, pp. 2–12.

15. Grenier-Loustalot M.F., Bente M.P., Grenier Ph. Reactivite du dicyandiamide vis a vis des groupements et N-epoxide-1. Mechanism reactionnel. *European Polymer Journal*, 1991, vol. 27, no. 11, pp. 1201–1216.
16. Dulnev G.N., Zarichnyak Yu.P. *Thermal conductivity of mixtures and composite materials: a reference book*. Leningrad: Energiya, 1974, 264 p.
17. Barinov D.Ya. About selection of optimal thickness of the carbon sample for thermal conductivity measurements using laser flash method. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 12. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 19, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-131-140.
18. Gulyaev A.I., Medvedev P.N., Sbitneva S.V., Petrov A.A. Experimental research of «fiber–matrix» adhesion strength in carbon fiber epoxy/polysulphone composite. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 80–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-80-86.
19. Morozov S.V., Pavlov N.A., Zenin M.N. Study of the influence of the composition of an epoxy binder on its physical and mechanical characteristics. *Polzunovskiy Vestnik*, 2020, no. 1, pp. 140–144. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2020.01.027.
20. Vodovozov G.A., Osipchik V.S., Marakhovsky K.M., Papina S.N., Klyushnikov S.A. Modification of an epoxy-containing binder to create high-strength composites. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2015, vol. XXIX, no. 10, pp. 20–22.
21. Malakhovskiy S.S., Panafidnikova A.N., Kostromina N.V., Osipchik V.S. Carbon plastics in the modern world: their properties and applications. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2019, vol. XXXIII, no. 6, pp. 62–64.
22. Chutskova E.Yu., Aleksashin V.M., Barinov D.Ya., Dementyeva L.A. The differential scanning calorimetry application for kinetic regularities investigation of the epoxy adhesive VK-36R curing process. *Trudy VIAM*, 2015, no. 1, paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 19, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-12-12.
23. Zelenina I.V., Gulyayev I.N., Kucherovskiy A.I., Mukhametov R.R. Heat-resistant CFRP for the impulse wheel of the centrifugal compressor. *Trudy VIAM*, 2016, no. 2 (38), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 19, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-8-8.
24. Aleksashin V.M. *Features of the interaction of components and their influence on the processes and technology of the formation of epoxy organoplastics*: authors thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2001, 28 p.
25. Fedoseev M.S., Derzhavinskaya L.F., Oshchepkova T.E. et al. Influence of the chemical nature of epoxy binders on some properties of cured compositions during thermal aging. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2012, no. 7, pp. 8–12.

Информация об авторах

Старков Алексей Игоревич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Куцевич Кирилл Евгеньевич, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Антофеева Наталья Викторовна, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Alexey I. Starkov, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Kirill E. Kutsevich, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Natalya V. Antufeeva, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 16.11.2021; получена после доработки 30.12.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 27.01.2023.
The article was submitted 16.11.2022; received in revised form 30.12.2022; approved and accepted for publication after reviewing 27.01.2023.