

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-52-62

ВЫБОР ОТВЕРЖДАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ С ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫМ РЕЖИМОМ ОТВЕРЖДЕНИЯ

М.А. Гусева¹, З.Д. Ибрагимов¹

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

Аннотация. Полимерные связующие с энергоэффективным режимом отверждения – композиции, содержащие в своем составе отвердители и ускорители отверждения, способные отверждать полимерную систему при невысоких температурах (120–150 °С) с минимальными временными затратами при сохранении повышенных прочностных и термомеханических характеристик полимерных композиционных материалов, получаемых на их основе. В данной статье представлена технология разработки полимерного связующего с выбором отверждающей системы для получения композиции с энергоэффективным режимом отверждения при решении вопросов, связанных с импортозамещением.

Ключевые слова: разработка полимерных связующих, эпоксидные композиции, энергоэффективность, режим отверждения, каталитическая система, отвердитель

Для цитирования: Гусева М.А., Ибрагимов З.Д. Выбор отверждающей системы при разработке эпоксидных композиций с энергоэффективным режимом отверждения // Труды ВИАМ. 2024. № 3 (133). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-52-62.

Scientific article

SELECTION OF CURING SYSTEM WHEN DEVELOPING EPOXY COMPOSITIONS WITH ENERGY-EFFICIENT CURING MODE

M.A. Guseva¹, Z.D. Ibragimov¹

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

Abstract. Polymer binders with an energy-efficient curing mode are compositions containing hardeners and curing accelerators that are capable of curing the polymer system at low temperatures (120–150 °C), with minimal time, while maintaining the increased strength and thermomechanical characteristics of PCM, derived from it. This paper presents a technology for the development of a polymer binder with selection of a curing system to obtain an epoxy composition with an energy-efficient curing mode as part of import substitution issues.

Keywords: development of polymer binders, epoxy compositions, energy efficiency, curing mode, catalytic system, hardener

For citation: Guseva M.A., Ibragimov Z.D. Selection of curing system when developing epoxy compositions with energy-efficient curing mode. *Trudy VIAM*, 2024, no. 3 (133), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-52-62.

Введение

В настоящее время особенно актуален вопрос удешевления стоимости композиционных конструкций, которые всегда были дороже аналогичных деталей, выполненных из металла. На стоимость изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) в первую очередь влияют цены на волокна, полимерные связующие, расходные материалы и оборудование, а также трудоемкость и энергоемкость их производства, поэтому важно демонстрировать постоянную тенденцию к дальнейшему их снижению. Дороговизна современных ПКМ объясняется энергозатратами на автоклавную технологию и высокой стоимостью технологического оборудования, широко применяемых на современном этапе во многих областях промышленности для изготовления высокопроизводительных компонентов из передовых композитов. С ростом производства конструкций из ПКМ увеличивается и потребность в разработке передовых промышленных технологий безавтоклавного формования. В последние годы разработчиками и ведущими специалистами разрабатываются и активно внедряются в промышленность быстроотверждаемые связующие, для которых не требуется применение метода автоклавного формования, за счет чего возможно значительно сократить технологический цикл производства компонентов [1–6].

Существует также возможность снизить стоимость производства ПКМ, применяя связующие, которые быстро отверждаются при невысоких температурах (120–150 °С), не ухудшая их прочностные и термомеханические характеристики. Применение эпоксидных связующих, в состав которых входят определенные отвердители и ускорители отверждения, позволяет создавать ПКМ с повышенными прочностными и термомеханическими характеристиками при невысоких температурах и коротких временных сроках отверждения. Такие связующие позволяют сократить продолжительность производства материалов и изделий, что приводит к экономии затрат и увеличению производительности получения ПКМ [6].

Получение композиционных материалов с энергоэффективным режимом формования – одна из перспективных разработок, которая может применяться в изделиях конструкционного назначения для авиационной, машиностроительной и судостроительной промышленности. Разрабатываемые по этой технологии связующие являются экологически чистыми – в их состав не входят органические растворители, что влияет на жизнеспособность композиций. Они обеспечивают повышенные эксплуатационные и физико-механические свойства ПКМ, а также снижают стоимость конечной продукции [7].

Материалы и методы

В данной работе объектом исследований стали экспериментальные композиции на основе смеси эпоксидных смол марок ЭХД и ЭД-22 с отвердителем каталитического типа марки УП-605/3 с применением различных растворителей, таких как фурфуроловый спирт, этиленгликоль, полиэтиленгликоль ПЭГ-400 и диметилсульфоксид, в сочетании с низковязким аминным отвердителем марки Джеффамин D-230 и алифатическим аминным отвердителем марки ХТ-488/4.

Для определения тепловых эффектов реакции использовали дифференциальный сканирующий калориметр. Испытания проводили в условиях нагрева – с 25 до 250 °С со скоростью 5 и 10 °С/мин по ГОСТ Р 56755–2015.

Исследование физико-механических характеристик отвержденных образцов композиций проводили на разрывной машине Тиратест 2300. Размер образцов регламентирован ГОСТ 4648–71: длина L – не менее 80 мм, ширина $b = 10,0 + 0,5$ мм, толщина $h = 4,0 + 0,2$ мм, с приложением нагрузки строго в середине между опорами.

Время желатинизации композиций определяли при изотермической выдержке при различных температурах на полимеризационной плитке, которая представляла собой диск диаметром 140 ± 1 мм из нержавеющей стали с шестью лунками диаметром 24 ± 1 мм и глубиной $6 \pm 0,5$ мм, с гильзой для термометра диаметром 12 мм и высотой 30 ± 1 мм, совмещенной с электронагревательным прибором [8].

Термомеханические свойства отвержденных композиций определяли на приборе термического механического анализа по ГОСТ 56723–2015 в температурном интервале $10\text{--}130$ °С, со скоростью сканирования 10 °С/мин, а также на приборе динамического механического анализа по ГОСТ Р 56753–2015 в температурном интервале $20\text{--}400$ °С, со скоростью сканирования 5 °С/мин.

Испытания экспериментальных образцов полимерных композиций выполнены с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Энергоэффективный режим отверждения предполагает формирование полимерных связующих при пониженных температурах и с минимальными временными затратами, что позволяет существенно повысить производительность получения ПКМ при значительно более низких экономических расходах. Как правило, данный режим формирования соответствует максимальному значению температур до $120\text{--}150$ °С и времени $2\text{--}3$ ч.

Разработка связующих с энергоэффективным режимом отверждения является одной из сложнейших задач, от решения которой зависит технология изготовления изделия и его последующее применение. Для разработки быстроотверждаемого ПКМ важен подбор требуемого отвердителя. Правильно подобранный отвердитель определяет скорость реакции, температуру и метод обработки, а также срок хранения препрега и связующего [7, 9–15].

Выбор исходных компонентов для разработки композиций с энергоэффективным режимом отверждения основывался на анализе научно-технических литературных данных и их экономической доступности. В качестве основных компонентов смол в данной работе использовали эпоксидную диановую смолу марки ЭД-22 на основе бисфенола А и хлорсодержащую эпоксидную смолу марки ЭХД. В качестве отвердителя выбран латентный отвердитель УП605/3 – комплекс трехфтористого бора с бензиламином, который способен отверждать эпоксидные композиции с высокой скоростью при невысоких температурах (от 90 до 180 °С) в течение от $2\text{--}3$ ч до нескольких секунд в зависимости от температуры и активности отвердителя. Джеффамина D-230 – это дифункциональный первичный амин (полиоксипропилендиамин), характеризующийся как низковязкий отвердитель эпоксидных смол в смеси с другими отвердителями с рабочими температурами отверждения в диапазоне от комнатной до $80\text{--}120$ °С. Введение отвердителя ХТ-488/4 (низковязкого модифицированного алифатического амина) способно обеспечить высокую прочность и упругость отвержденным композициям. Благодаря высокой реакционной способности данный отвердитель отверждает композиции за короткий временной срок при комнатной и повышенных температурах. Для введения отверждающих систем в смоляную основу при комнатной температуре применяли растворители.

Из представленных исходных компонентов изготовлены отверждающие системы на основе отвердителя УП-605/3 в различных растворителях. На основании практической работы по определению технологичности полученных смесей выбрали пять основных составов, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

Отверждающие системы экспериментальных композиций

Маркировка отверждающего состава (ОС)	Состав композиции	Соотношение компонентов, мас. ч.
ОС1	Фурфуриловый спирт Отвердитель УП-605/3	80 20
ОС2	Этиленгликоль Отвердитель УП-605/3	80 20
ОС3	Полиэтиленгликоль ПЭГ-400 Отвердитель УП-605/3	80 20
ОС4	Джеффамин D-230 Отвердитель УП-605/3	80 20
ОС5	Диметилсульфоксид Фурфуриловый спирт Отвердитель УП-605/3	30 80 20

Для выбора отверждающего состава, отвечающего условиям энергоэффективности, изготовлены экспериментальные композиции на основе смол различного соотношения и выбранных отверждающих систем. Скорость процесса отверждения экспериментальных композиций оценивали по времени желатинизации при температурах 90, 100 и 110 °С, а также по внешнему виду и хрупкости образцов, отвержденных в тепло-вентиляционном шкафу при температурах 120 и 150 °С в течение 60 мин.

По времени желатинизации, которое позволяет оценить скорость реакции отверждения при выбранной температуре, установили, что для отверждающего состава на основе фурфурилового спирта (ОС1) реакция идет намного быстрее при температурах 90, 100 и 110 °С (образцы твердые, но могут быть хрупкими), чем для составов на основе этиленгликоля (ОС2) и полиэтиленгликоля (ОС3). Использование диметилсульфоксида, Джеффамин D-230 и отвердителя ХТ-488/4 снижает скорость реакции отверждения эпоксидной смолы (образцы остаются жидкими в рассматриваемом временном интервале либо наблюдается лишь увеличение вязкости), что происходит, по-видимому, вследствие сильного эффекта разбавления выбранных систем (ОС2, ОС3 и ОС5) в рассматриваемом диапазоне температур и образования более устойчивых комплексов фторида бора, чем аминов (ОС4).

Таким образом, для дальнейшей работы выбрана отверждающая система ОС1, которая наилучшим образом подходит для применения в условиях энергоэффективного режима отверждения. Отверждающая система ОС1 технологически проста в изготовлении, так как отвердитель УП-605/3 лучше растворяется в фурфуриловом спирте, чем в гликолях, а раствор является более жидким и быстрореагирующим составом, чем остальные опробованные варианты.

При исследовании влияния соотношения выбранной отверждающей системы и ускорителя отверждения (ЭХД) на эксплуатационные свойства эпоксидной композиции изменяли соотношение смол ЭД-22, ЭХД и отверждающей системы ОС1. В табл. 2 представлены составы экспериментальных композиций с разным соотношением ускорителя (ЭХД) и состава ОС1, приведены данные по времени желатинизации и внешнему виду при отверждении навесок композиций при температурах 120 и 150 °С за отведенное время.

Составы экспериментальных композиций

Условный номер образца	Состав композиции, мас. ч.		Время желатинизации, мин, при температуре, °С			Внешний вид после прогрева в течение 60 мин при температуре, °С	
			90	100	110	120	150
1	ЭД-22 ЭХД ОС1	100 0 5	–	–	>60	Мягкий	Гибкий
2	ЭД-22 ЭХД ОС1	80 20 5	46	18	6	Мягкий	Твердый
3	ЭД-22 ЭХД ОС1	70 30 5	25	14	5	Мягкий	Твердый
4	ЭД-22 ЭХД ОС1	60 40 5	10	4	3	Гибкий	Твердый
5	ЭД-22 ЭХД ОС1	40 60 5	8	3	2	Твердый	Твердый
6	ЭД-22 ЭХД ОС1	100 0 10	–	–	>60	Мягкий	Твердый
7	ЭД-22 ЭХД ОС1	80 20 10	28	15	5	Мягкий	Твердый
8	ЭД-22 ЭХД ОС1	70 30 10	19	6	3	Мягкий	Твердый
9	ЭД-22 ЭХД ОС1	60 40 10	13	5	3	Твердый	Твердый
10	ЭД-22 ЭХД ОС1	40 60 10	12	6	3	Подгорел	Сгорел
11	ЭД-22 ЭХД ОС1	100 0 15	–	>60	47	Мягкий	Твердый
12	ЭД-22 ЭХД ОС1	80 20 15	54	26	13	Мягкий	Твердый, хрупкий
13	ЭД-22 ЭХД ОС1	70 30 15	2	9	3	Упругий, гнется	Твердый
14	ЭД-22 ЭХД ОС1	60 40 15	17	7	6	Твердый, темный	Твердый, темный
15	ЭД-22 ЭХД ОС1	40 60 15	19	7	3	Сгорел	Сгорел

Процессу отверждения экспериментальных композиций способствует наличие азотсодержащей эпоксидной смолы ЭХД, применяемой в качестве ускорителя процесса отверждения при пониженной температуре. Однако образцы с содержанием <40 мас. ч. данной смолы – не доотверждались.

Установлено также, что образцы с содержанием 5 мас. ч. ОС1, подвергнутые прогреву при температуре 120 °С в течение 60 мин, не отверждались. Образцы с содержанием 20–30 мас. ч. смолы ЭХД, прогретые при температуре 150 °С в тот же период времени, отверждались, но получались хрупкими или меняли цвет на более темный. Только образцы 4 и 5, содержащие 40 и 60 мас. ч. смолы ЭХД, отвержденные по всем температурным режимам, оказались оптимальными для поставленной задачи. При этом образцы, содержащие в составе 10 мас. ч. ОС1, при температуре 120 °С также не доотверждались, а при температуре 150 °С становились достаточно твердыми, но содержание смолы ЭХД составляло 40 и 60 мас. ч. Образцы, с содержанием в составе 15 мас. ч. ОС1, отвержденные при температурах 120 и 150 °С, содержащие <20 мас. ч. смолы ЭХД, не отверждались. Составы, содержащие 30 и 40 мас. ч. смолы ЭХД, по окончании времени отверждения не доотверждались – получались гибкими или хрупкими и темнели. Образец, который содержал в составе 60 мас. ч. смолы ЭХД, сгорел в процессе отверждения.

На основании оценки соотношения «скорость/время реакции отверждения» из предварительных экспериментов, представленных в табл. 2, отобраны образцы с номерами 4, 5, 9 и 10, содержащие 40 и 60 мас. ч. смолы ЭХД, и в неотвержденном виде исследованы методом дифференциальной сканирующей калориметрии для определения тепловых эффектов реакции отверждения и расчета степени отверждения.

В табл. 3 представлены значения температурных пиков и тепловых эффектов для выбранных экспериментальных составов.

Таблица 3

Результаты дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) измерений неотвержденных образцов экспериментальных композиций

Условный номер образца	Температурный интервал пика ДСК, °С			Тепловой эффект, Дж/г
	Начало	Пик	Конец	
4	98	122	163	294
5	98	118	156	231
9	97	119	184	408
10	101	121	190	469

Увеличение содержания отверждающей системы с 5 до 10 мас. ч. вызывает рост теплового эффекта не менее чем на 30 % – с 231 до 469 Дж/г. Для снижения влияния экзотермичности реакции отверждения по кривым дифференциальной сканирующей калориметрии выбран ступенчатый режим: выдержка при температуре 85 °С в течение 30 мин, затем поднятие температуры до 100 °С (выдержка в течение 30 мин), доотверждение при температуре 120 (вариант 1) либо 150 °С (вариант 2). В целом все ступени выбранного режима укладываются во временной интервал 3 ч. Выбранный поэтапный режим отверждения объясняется тем, что при температуре 85 °С происходит значительный рост вязкости, связующее застекловывается, а при достижении температуры 100 °С составы окончательно формуются, что позволяет извлекать уже отвержденные образцы из пресс-форм для дальнейшего доотверждения в тепловентиляционном шкафу при выбранной температуре по варианту 1 или 2 (табл. 4). Кроме того, ступенчатый режим отверждения полимерных связующих позволяет получать более плотно сшитые структуры с минимальными дефектами. При таком режиме образцы постепенно отверждаются и получают прочными с необходимыми характеристиками.

Таблица 4

Определение степени отверждения экспериментальных композиций методом дифференциальной сканирующей калориметрии

Условный номер образца	Тепловой эффект, Дж/г			Степень отверждения, %	
	Исходные образцы	Отверждение по варианту 1	Отверждение по варианту 2	по варианту 1	по варианту 2
4	294	132	41	55	86
5	231	106	47	54	79
9	408	229	31	44	92
10	469	253	14	46	97

Для расчета степени отверждения отвержденного связующего по режимам 1 и 2 использовали приближение пропорциональности степени отверждения и теплового эффекта реакции:

$$\alpha = \left(1 - \frac{\Delta Q_{\text{отв}}}{\Delta Q_{\text{неотв}}}\right) \cdot 100 \%,$$

где α – степень отверждения; $\Delta Q_{\text{отв}}$ – тепловой эффект отверждения; $\Delta Q_{\text{неотв}}$ – тепловой эффект неотвержденного связующего.

Таким образом, образец 10 с содержанием 10 мас. ч. ОС1 и выдержкой для доотверждения при температуре 150 °С показал максимальную расчетную степень отверждения отвержденной экспериментальной композиции.

Температура стеклования – важный эксплуатационный параметр, который позволяет оценить рабочую температуру композиции в отвержденном состоянии и влияет на эксплуатационные свойства готового изделия при повышенных температурах. Знание температуры стеклования полимерного связующего позволяет определить оптимальные условия формования, улучшить качество изготовленных изделий, учесть особенности материала и достичь лучших результатов в производственных процессах. Поэтому на следующем этапе проводили испытания по определению температуры стеклования экспериментальных композиций (табл. 5).

Таблица 5

Температура стеклования отвержденных образцов экспериментальных композиций, определенная методом термомеханического анализа

Условный номер образца	Температура стеклования, °С	
	по варианту 1	по варианту 2
4	34	116
5	47	126
9	39	125
10	52	157

По результатам термомеханического анализа видно, что температура стеклования выше у образцов, содержащих 60 мас. ч. смолы ЭХД, которая в данной композиции является ускорителем процесса отверждения при сниженной температуре, и 10 мас. ч. ОС1 (образец 10).

Установлено также, что составам для отверждения недостаточно финальной ступени при температуре 120 °С, так как при этой температуре образцы не доотверждаются, температура стеклования имеет очень низкие значения, а степень превращения отвержденного связующего составляет 45–55 %. Для более полного отверждения экспериментальных композиций необходимо повышать температуру на третьей ступени выбранного режима отверждения до 150 °С. Отвержденные при такой температуре и выбранном временном интервале (суммарно ~3 ч) образцы показывают более высокие результаты при термомеханических испытаниях.

Под действием влаги и водяных паров полимерные материалы подвергаются существенным изменениям. Проникновение влаги в полимер сопровождается уменьшением межмолекулярного взаимодействия, которое при минимальном воздействии до определенного уровня может служить пластификатором, но при дальнейшем увеличении этого влияния – привести к дефектам в изделии.

Для исследования влагопоглощения экспериментальных композиций отвержденные образцы 4, 5, 9 и 10 кипятили в течение 24 ч для определения температуры стеклования до и после кипячения. Степень влагопоглощения определяли гравиметрическим методом по формуле (табл. 6):

$$W = \frac{M_{\text{послекип}} - M_{\text{докип}}}{M_{\text{докип}}} \cdot 100 \%$$

Таблица 6

Результаты определения влагопоглощения и температуры стеклования экспериментальных композиций методом механического динамического анализа

Условный номер образца	Температура стеклования, °С		Влагопоглощение, %
	до кипячения	после кипячения	
4	116	63,9	1
5	126	87,1	1,3
9	125	72,2	1
10	157	107,8	1,4

У всех выбранных экспериментальных составов показатель влагопоглощения по процентному значению низкий: 1–1,4. Однако температура стеклования отвержденных образцов после воздействия влаги значительно снизилась, но для образца 10 осталась достаточно высокой.

Прочность энергоэффективных изделий при статическом изгибе является одной из главных характеристик многих композиций. Для проведения физико-механических испытаний экспериментальных составов из них изготовили отливки по выбранному режиму отверждения (вариант 2) и провели испытания на статический изгиб (табл. 7).

Таблица 7

Физико-механические свойства (средние значения) образцов при испытании на статический изгиб (до кипячения)

Условный номер образца	Предел прочности при изгибе, МПа	Модуль упругости при изгибе, ГПа
4	119	6,5
5	126	6,3
9	115	5,7
10	143	7,6

Для образцов 4 и 5 не наблюдается значительной разницы в значениях модуля упругости, в отличие от образцов 9 и 10. Прочность при разрушении больше у образцов с содержанием 60 мас. ч. ЭХД в смоляной основе. Более высокая прочность при изгибе получена для состава 10 – модуль упругости составляет 7,6 ГПа. Данный показатель превышает значения прочности по сравнению с другими составами и демонстрирует сохранение повышенных прочностных характеристик, что делает теоретически возможным использование этой экспериментальной композиции при создании конструкционных материалов.

Для ПКМ основным контрольным параметром влияния влагопоглощения на свойства является прочность при изгибе. В табл. 8 представлены результаты физико-механических испытаний образца 10 после кипячения в течение 24 ч как образца с наилучшими показателями температуры стеклования, степени отверждения и модуля упругости. Снижение значения предела прочности при статическом изгибе образца 10 после кипячения в течение 24 ч до равновесного состояния относительно значения для исходного образца до кипячения составило: около 25 % – при 20 °С и 26 % – при 80 °С.

Таблица 8

Физико-механические свойства (средние значения) образца экспериментального состава 10 до и после кипячения в течение 24 ч

Предел прочности при статическом изгибе, МПа		Модуль упругости, ГПа				Влагопоглощение образца после 24 ч кипячения, %		
до кипячения	после кипячения	до кипячения		после кипячения				
при температуре испытания, °С								
20	80	20	80	20	80			
143	125	107	92	7,6	6,6	5,2	4,9	1,1

Заключения

Из анализа проведенных испытаний видно, что образец из полимерной композиции состава 10, содержащий 60 мас. ч. ЭХД и 10 мас. ч. отверждающей системы ОС1, показал лучший результат по сравнению с другими образцами и наибольшее соответствие энергоэффективному режиму отверждения, описанному в научно-технической литературе, а соотношения ускорителя ЭД-22 к смоле ЭХД и системе ОС1 являются наиболее оптимальными по скорости и температуре отверждения композиции, а также по тепловому эффекту реакции.

Список источников

1. Панина Н.Н., Ким М.А., Гуревич Я.М., Григорьев М.М., Чурсова Л.В., Бабин А.Н. Связующие для безавтоклавного формования изделий из полимерных композиционных материалов // Клеи. Герметики. Технологии. 2013. № 10. С. 18–27.
2. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Абрамов П.А. Пути повышения качества деталей из ПКМ при вакуумном формовании // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 4 (3). С. 831–838.
3. Постнова М.В., Постнов В.И. Опыт развития безавтоклавных методов формирования ПКМ // Труды ВИАМ. 2014. № 4. Ст. 06. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 10.01.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-4-6-6.
4. Хрульков А.В., Григорьев М.М. Перспективы рынка безавтоклавных технологий в авиастроении // Сб. докл. конф. «Безавтоклавные технологии переработки полимерных композиционных материалов нового поколения». М.: ВИАМ, 2015. Ст. 09.
5. Вешкин Е.А. Технологии безавтоклавного формования низкопористых полимерных композиционных материалов и крупногабаритных конструкций из них: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 146 с.

6. Тростянская Е.Б., Михайлин Ю.А., Кулик С.Г., Степанова М.А. Связующие на основе эпоксидных смол: учеб. пособие. М., 1990. С. 27.
7. Коган Д.И., Чурсова Л.В., Панина Н.Н. и др. Перспективные полимерные материалы для конструкционных композиционных изделий с энергоэффективным режимом формования // Пластические массы. 2020. № 3–4. С. 52–54.
8. Иванов Н.В., Гуревич Я.М., Хасков М.А., Акмеев А.Р. Изучение режима отверждения связующего ВСЭ-34 и его влияния на механические свойства // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 2 (47). С. 50–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-50-55.
9. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов: учеб. пособие / под ред. Е.Н. Каблова. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2021. С. 363.
10. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. № S. С. 7–17.
11. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В. Мельников А.А., Щур П.А. Применение функциональных и адаптивных материалов, полученных способом 3D-печати (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 2 (108). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-32-51.
12. Мишкин С.И., Малаховский С.С. Быстроотверждаемые связующие и препреги: получение, свойства и области применения (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 5 (77). Ст. 04. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 10.11.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-32-40.
13. Донецкий К.И., Хрульков А.В. Принципы «зеленой химии» в перспективных технологиях изготовления изделий из ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2014. № S2. С. 24–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-S2-24-28.
14. Большаков В.А., Антифеева Н.В. Оценка модели процесса отверждения клеевого связующего в препреге // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 4 (73). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 25.11.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-66-77.
15. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.11.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.

References

1. Panina N.N., Kim M.A., Gurevich Ya.M., Grigoriev M.M., Chursova L.V., Babin A.N. Binders for non-autoclave molding of products from polymer composite materials. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2013, no. 10, pp. 18–27.
2. Veshkin E.A., Postnov V.I., Abramov P.A. Ways to improve the quality of PCM parts during vacuum forming. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2012, vol. 14, no. 4 (3), pp. 831–838.
3. Postnova M.V., Postnov V.I. Development experience out-of-autoclave methods of formation PCM. *Trudy VIAM*, 2014, no. 4, paper no. 06. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: January 10, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-4-6-6.
4. Khrulkov A.V., Grigoriev M.M. Prospects for the market for non-autoclave technologies in the aircraft industry. *Reports conf. «Non-autoclave technologies for processing new generation polymer composite materials»*. Moscow: VIAM, 2015, paper no. 09.
5. Veshkin E.A. *Technologies for non-autoclave molding of low-porosity polymer composite materials and large-sized structures made from them*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2016, 146 p.
6. Trostyanskaya E.B., Mikhailin Yu.A., Kulik S.G., Stepanova M.A. *Binders based on epoxy resins*: textbook. Moscow, 1990, p. 27.
7. Kogan D.I., Chursova L.V., Panina N.N. et al. Promising polymer materials for structural composite products with energy-efficient molding mode. *Plasticheskie massy*, 2020, no. 3–4, pp. 52–54.
8. Ivanov N.V., Gurevich Ya.M., Khaskov M.A., Akmееv A.R. Studying of cure mode of VSE-34 binding and its influences on mechanical properties. *Aviacionnyye materialy i tehnologii*, 2017, no. 2 (47), pp. 50–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-50-55.

9. Mukhametov R.R., Petrova A.P. *Thermosetting binders for polymer composite materials*: textbook. Ed. E.N. Kablov. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2021, p. 363.
10. Kablov E.N. Strategic Areas of Developing Materials and Their Processing Technologies for the Period up to 2030. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 7–17.
11. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Melnikov A.A., Schur P.A. Application of functional and adaptive materials obtained by 3D printing (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 20, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-3-3.
12. Mishkin S.I., Malakhovskiy S.S. Fast curing resins and prepregs: receiving, properties and areas of application (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 5 (77), paper no. 04. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: November 10, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-32-40.
13. Donetskii K.I., Khrulkov A.V. Principles of «green chemistry» in perspective manufacturing technologies of PCM articles. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. S2, pp. 24–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-S2-24-28.
14. Bolshakov V.A., Antyufeeva N.V. Evaluation of the curing process model of the adhesive binder in prepreg. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 25, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-66-77.
15. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 15, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.

Информация об авторах

Гусева Марина Александровна, старший научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ибрагимов Зенур Дилаверович, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Marina A. Guseva, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Zenur D. Ibragimov, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 14.02.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 16.02.2024.
The article was submitted 14.02.2024; approved and accepted for publication after reviewing 16.02.2024.