

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-1-100-108

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ФОРМОВАНИЯ ПРЕПРЕГОВ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Н.В. Антюфеева¹, В.А. Большаков¹

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

Аннотация. С использованием метода дифференциальной сканирующей калориметрии изучена кинетика отверждения связующего в препреге. Определена наиболее адекватная схема реакции отверждения, и для каждой элементарной стадии процесса вычислены кинетические параметры. На основе полученных экспериментальных данных построены обобщенные кинетические модели реакции отверждения, затем подобраны режимы отверждения связующего в препреге на основе как экспериментальных, так и расчетных данных, которые проверены на технологическом оборудовании. В результате определена степень отверждения материала.

Ключевые слова: связующее, препрег, отверждение, термический анализ, кинетические параметры, кинетика отверждения

Для цитирования: Антюфеева Н.В., Большаков В.А. Прогнозирование режимов формования препрегов для изделий авиационной техники // Труды ВИАМ. 2025. № 1 (143). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-1-100-108.

Scientific article

FORECASTING MODES OF MOLDING PREPREGS FOR AIRCRAFT PRODUCTS

N.V. Antyufeeva¹, V.A. Bolshakov¹

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 binder in prepreg was studied by differential scanning calorimetry method. 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. On the basis of experimental data, generalized kinetic models of the curing reaction were constructed, and then the curing modes of the binder in the prepreg were selected based on both experimental and calculated data, which were tested on technological equipment. As a result, the degree of material curing was determined.

Keywords: adhesive binder, prepreg, curing, thermal analysis, kinetic parameters, kinetics of curing

For citation: Antyufeeva N.V., Bolshakov V.A. Forecasting modes of molding prepregs for aircraft products. *Trudy VIAM*, 2025, no. 1 (143), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-1-100-108.

Введение

В последние годы наблюдается активное распространение и рост использования полимерных композиционных материалов (ПКМ), что сопровождается расширением ассортимента этой перспективной группы материалов. Применение композитов особенно востребовано в тех областях промышленности, где требуется получение легких изделий, обладающих высокой прочностью, – главным образом в таких как аэрокосмическая, автомобильная и другие отрасли. Увеличение объемов использования полимерных композитов в конструкциях приводит к повышению уровня требований, предъявляемых к ним, а следовательно, и к методам контроля качества получаемых материалов. Появляется также необходимость в прогнозировании их свойств на ранних этапах производства, при оптимизации процессов изготовления ПКМ – главным образом температурных режимов их формования. Необходима оптимизация режимов для существующих типов полимерных матриц (связующих), а также методологическое улучшение и анализ процессов, происходящих при изготовлении ПКМ. Повышение критериев качества материалов инициирует увеличение точности испытательного оборудования, предназначенного для их анализа; расширение спектра свойств, получаемых с помощью этого оборудования, а также оптимизацию температурных режимов формования ПКМ для достижения максимальной степени конверсии в полимерной матрице.

Преимущества композитов связаны, прежде всего, с возможностью регулирования практически всех свойств материала, которое можно осуществлять путем подбора составляющих компонентов матрицы, их количественного соотношения, распределения и ориентации в объеме материала. Это позволяет получать ПКМ многофункционального назначения, которые обладают различными характеристиками, обусловленными свойствами и природой сочетаемых в композите компонентов. На стадии совмещения волокон с полимерной матрицей необходимо обеспечить термодинамическую и физико-химическую совместимость компонентов, изучить механизм отверждения связующего в препреге и подобрать процесс формования ПКМ. Подбор оптимального режима прессования для формования углепластиков по препреговой технологии требует опыта и знаний в области материаловедения. В работах [1–2] рассмотрены основные принципы определения режимов формования для углепластиков на основе препрегов, что позволяет сократить объем экспериментальных работ при разработке режима формования.

Важнейшие конструкционные свойства углепластиков, такие как прочность при растяжении, вязкость разрушения и сопротивление усталости, в первую очередь определяются прочностью армирующих волокон. Однако разработка суперпрочных волокон – важная, но только одна часть общей проблемы совершенствования свойств углепластиков. Не менее важной является реализация прочностных и упругих свойств волокон в композите. Решающее значение приобретают проблемы обеспечения физико-химической, термодинамической и механо-деформационной совместимости и соответствия волокон и матриц в композите, определяющих требуемую монолитность на стадии получения материала и изделия, а также в течение всего их ресурса. На стадии совмещения волокон с веществом будущей твердой матрицы необходимо обеспечить термодинамическую и физико-химическую совместимость компонентов (контакт–взаимодействие). Преобладающее значение упруго-прочностных характеристик волокон сказывается в основном на свойствах однонаправленного углепластика, в то время как влияние матрицы проявляется практически в каждой статической, динамической и эксплуатационной технологической и экологической характеристиках материала, причем в большинстве случаев именно свойства матрицы и

границы раздела являются определяющими, особенно для материалов с перекрестной укладкой слоев. Поэтому разработка связующих составов и изучение закономерностей формирования полимерных матриц, границы раздела «углеродное волокно–матрица», образование физических и химических связей с волокном и в полимерной сетке твердой матрицы являются основой получения углепластиков с заданными свойствами и технологичностью [3, 4].

Основные требования к конструкционным материалам (наряду с механическими и специальными свойствами) – способность работы в экстремальных условиях, сопротивление воздействию эксплуатационных факторов и среды, а также сохранение этой способности в течение всего ресурса и календарного срока эксплуатации изделия с возможностью надежного прогнозирования эксплуатационного ресурса [5, 6].

Технологии получения компонентов и переработки в изделия композитов (в том числе и углепластиков) принципиально отличаются от традиционных технологических процессов получения конструкционных материалов и изделий из них. Заданные свойства углепластика достигаются непосредственно при формировании конструкций на стадии совмещения компонентов, формообразования и термообработки. Поскольку материал и конструкция создаются одновременно, то для успешного решения задачи создания эффективного изделия необходимо использование методов термического анализа. Термоаналитические комплексы, оснащенные вычислительной техникой, способны решать самые разнообразные материаловедческие и технологические задачи как в прикладных научных исследованиях, так при контроле качества продукции, поставляемой производственным предприятиям. Основные требования, предъявляемые к методикам анализа в условиях производства, – это высокие точность и производительность экспериментальных работ, а также ограниченность возможности субъективных оценок результатов исследований [7, 8].

Выбор температурно-временных режимов формирования препрега имеет решающее значение для достижения максимальной тепло- и термостойкости полимеров. Один из наиболее важных критериев при выборе таких режимов – это равномерность тепловыделения, особенно для полимер-олигомерных терморепреактивных составов из-за их особенностей отверждения [10]. Для определения температурно-временного режима часто используют термокинетические расчеты с использованием метода дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), что позволяет прогнозировать параметры кинетических уравнений реакции и оптимизировать процессы формирования. Подбор оптимального режима прессования для формирования углепластиков по препреговой технологии требует опыта и знаний в области материаловедения. В данной статье рассмотрены основные принципы определения режимов формования для углепластиков на основе препрегов, что позволяет снизить объем экспериментальных работ при разработке режима формования конкретного изделия.

Материалы и методы

В работе исследована кинетика отверждения образцов препрегов углепластиков на основе терморепреактивного связующего.

Терморепреактивное связующее – основной компонент препрегов, который определяет технологические и эксплуатационные характеристики изделий, поэтому его отверждение при формовании препрега – важный этап, заслуживающий особого внимания. [11, 12]. Проведены экспериментальные исследования образцов препрегов углепластика методом ДСК в статичной воздушной среде в интервале температур от 25 до 310 °С при скоростях нагрева, °С/мин: 5; 10 и 20 [13]. Навеску связующего выбирали

таким образом, чтобы прямолинейный ход температурной кривой при используемых скоростях нагрева не нарушался в температурном интервале экзотермического эффекта. Величина навески препрега составляла от 24 до 7 мг при скоростях нагрева от 5 до 20 °С/мин соответственно. Образцы навески взвешивали на аналитических весах с точностью измерения $\pm 0,00002$ г.

Для расчетов и построения кинетической модели реакции отверждения использовали экспериментальные данные, полученные методом ДСК.

С помощью специальной компьютерной программы осуществляли автоматизированное управление условиями проведения экспериментальных работ, а также измерение и первичную обработку результатов эксперимента. Для углубленного кинетического анализа результатов исследований использовали специализированные программные средства.

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

Результаты и обсуждение

Полученные экспериментальные результаты можно использовать для расчетов параметров кинетических уравнений реакции, таких как энергия активации, порядок реакции, предэкспоненциальный множитель, а также для построения и решения сложного кинетического уравнения, включающего различные параллельные и последовательные химические процессы [14, 15].

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

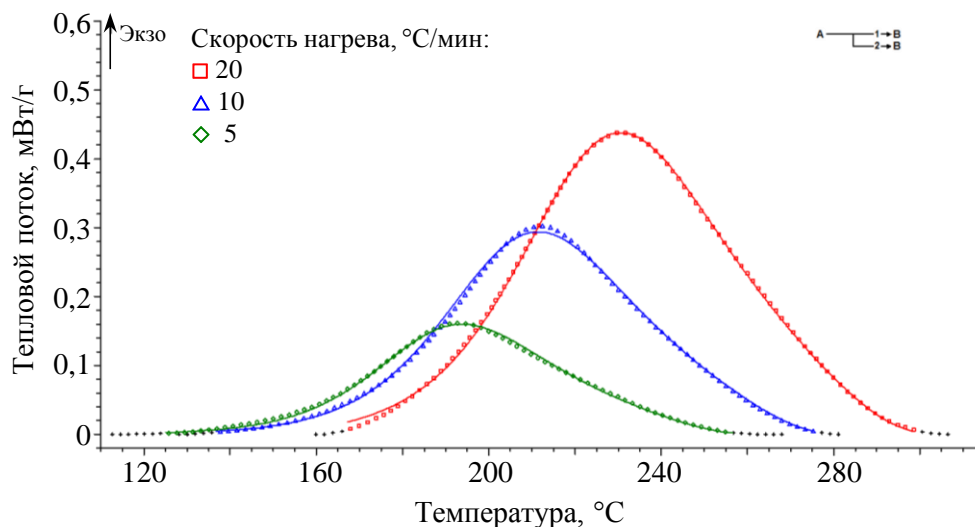


Рис. 1. Экспериментальные (точки) и расчетные (сплошная линия) кривые ДСК-реакции отверждения связующего в препреге углепластика

Видно, что корреляция расчетных и экспериментальных данных составила $>99\%$. Подбор расчетной модели осуществляли методом нелинейной регрессии. Рассчитанные кинетические параметры реакции отверждения для каждой элементарной стадии процесса приведены в табл. 1.

Полученные расчетные данные позволят технологам оперативно прогнозировать различные режимы подформовок крупногабаритных изделий и формования препрегов – задавать различные скорости нагрева препрега до определенной температуры,

выдерживать его при заданной температуре, а затем охлаждать до определенной температуры, повторяя заданные циклы многократно, а также получать конечную степень отверждения (рис. 2).

Таблица 1

Кинетические параметры реакции отверждения образцов препрега углепластика

Параметр	Значения параметров, полученные по трехстадийной реакции Prout–Tompkins n -го порядка с автокатализом
Предэкспоненциальный множитель A_1, c^{-1}	35141,5
$\log(A_1, c^{-1})$	4,54582
Энергия активации $E_1, \text{кДж/моль}$	61,63265
Порядок реакции n_1	1,08997
Константа автокатализа a_1	0,65070
Предэкспоненциальный множитель A_2, c^{-1}	67025,5
$\log(A_2, c^{-1})$	4,82624
Энергия активации $E_2, \text{кДж/моль}$	62,12135
Порядок реакции n_2	0,98432
Константа автокатализа a_2	0,22704
Предэкспоненциальный множитель A_3, c^{-1}	164835,2
$\log(A_3, c^{-1})$	5,21705
Энергия активации $E_3, \text{кДж/моль}$	70,74305
Порядок реакции n_3	1,05575
Константа автокатализа a_3	0,0377

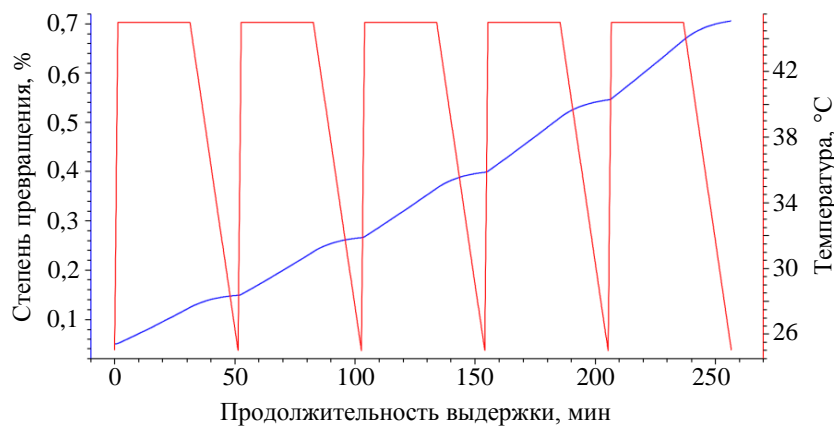


Рис. 2. Прогнозирование степени превращения горячей подпрессовки на основе рассчитанной кинетической модели (пять подформовок при температуре 45 °С по 30 мин)

На основе проведенных расчетов на технологическом оборудовании для крупногабаритных изделий сделаны горячие подформовки препрегов с разными выдержками при разных температурах и проведены экспериментальные исследования этих образцов методом ДСК.

В табл. 2 приведены данные по реакционной способности и степени отверждения связующего в препреге после горячих подформовок, которые проводили при разных температурах и выдержках.

Таблица 2

**Результаты оценки реакционной способности связующего
в препрегах углепластиков**

Температура, °С	Выдержка, ч	Температура стеклования неотвержденного препрега, °С	Температура начала активной реакции, °С	Температура пика T_{max} , °С	Тепловой эффект реакции отверждения ΔH , Дж/г	Содержание связующего		Степень отверждения
						%		
В исходном состоянии		-14,5	168,44	210,57	114,35	37,2		-
40	10	-14	170,49	212,72	114,51	36,8		0,9
	15	-13	170,14	212,69	123,29	38,6		-
	20	-12	168,65	211,50	114,10	37,1		0,5
50	10	-11	168,06	211,17	100,28	37,7		11,1
	15	-10	168,09	212,23	105,55	37,5		6,9
	20	-9	163,78	210,72	107,23	37,4		5,7
60	10	-13	164,60	209,40	104,50	37,6		7,6
	15	-7	167,42	209,63	101,09	37,4		11,1
	20	-2	159,82	209,80	97,12	37,4		14,6

По результатам исследований установлено, что показатели реакционной способности связующего в препреге соответствуют требованиям ТУ на препреги, но при этом наблюдается тенденция к деградации свойств подформованных препрегов с повышением температуры.

Варианты подформовок выбирали по степени конверсии (минимально допустимая степень конверсии установлена в процессе эксперимента). Результаты исследований приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Результаты исследования физико-химических свойств
образцов подформовок препрегов углепластиков**

Температура, время выдержки	Температура стеклования неотвержденного препрега, °С	Температура начала активной реакции, °С	Температура пика T_{max} , °С	Тепловой эффект реакции отверждения ΔH , Дж/г	Степень превращения, %	Степень превращения, % (модель)	Степень превращения, % (модель – 5 циклов)
В исходном состоянии	-11,29	168,44	210,57	114,35	-	-	-
40 °С, 70 мин	-12,55	168,25	211,90	114,23	0,1	0,2	0,6
40 °С, 40 мин	-11,59	168,11	211,59	114,28	0,1	0,1	0,3
40 °С, 10 мин	-11,21	168,14	210,64	114,32	0,06	0,05	0,06
50 °С, 70 мин	-11,49	168,21	210,57	113,51	0,7	0,6	1,2
50 °С, 40 мин	-11,34	168,19	211,67	113,94	0,4	0,5	1,0
50 °С, 10 мин	-11,27	168,36	211,48	114,12	0,2	0,3	0,7
60 °С, 70 мин	-11,42	168,18	210,57	110,91	3,0	3,1	6,7
60 °С, 40 мин	-11,25	168,14	211,35	111,24	2,7	2,9	5,1
60 °С, 10 мин	-11,29	168,07	211,42	112,68	1,4	1,6	3,1

Установлено, что степень превращения при подформовочном цикле с температурой 40 °С длительностью 70 мин является минимальной.

Для выбора температуры подформовок с учетом длительности режима дополнительно определяли жизнеспособность образцов препрегов при температурах 50 и 60 °С в течение 7,5 и 10 ч (имитирующих полный временной цикл подформовок), результаты указаны в табл. 4.

Таблица 4

Результаты исследования жизнеспособности препрегов в течение 7,5 и 10 ч (имитирующих полный временной цикл подформовок)

Температура, °С	Выдержка, ч	Время гелеобразования при 150 °С, мин	Температура стеклования неотвержденного препрега, °С	Температура начала активной реакции, °С	Температура пика T_{max} , °С	Тепловой эффект реакции отверждения ΔH , Дж/г	Степень превращения	Степень превращения по модели
							%	
В исходном состоянии		25,56	-11,46	168,44	210,57	114,35	-	-
50	7,5	25,16	-12,35	168,22	212,91	110,81	3,1	3,1
	10	24,25	-12,32	168,12	212,74	107,40	6,1	6,0
60	7,5	23,06	-10,28	168,91	210,50	106,36	7,0	7,0
	10	17,75	-11,62	168,70	212,74	100,77	11,9	12,0

Из полученных экспериментальных данных видно, что при температуре 50 °С степень превращения ниже, чем при температуре 60 °С. Поэтому нужно выбирать цикл подформовки с более низкой степенью превращения, т. е. температура горячих подпрессовок не должна быть >50 °С.

Заключения

В результате проведенных термоаналитических исследований определены реакционная способность и время гелеобразования связующего в препреге в исходном состоянии и после подформовок при разных температурах и выдержках. Подобраны схемы реакций отверждения, определено количество и типы реакций на элементарных стадиях. Установлено, что температура горячих подформовок не должна быть >50 °С. В результате проведенных исследований определена степень превращения горячих подформовок для крупногабаритных изделий как экспериментальным способом, так и с помощью рассчитанной кинетической модели. Подобраны режимы подформовок для отверждения связующего в препреге на основе как экспериментальных, так и расчетных данных, которые опробованы с положительным результатом на технологическом оборудовании.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Валуева М.И., Зеленина И.В., Хмельницкий В.В., Алексахин В.М. Углепластики на основе бензоксазиновых олигомеров – перспективные материалы // Труды ВИАМ. 2020. № 1 (85). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 22.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
2. Каблов Е.Н., Кулагина Г.С., Железина Г.Ф., Лонский С.Л., Куршев Е.В. Исследование микроструктуры однонаправленного органопластика на основе арамидных волокон Русар-НТ и эпоксидно-полисульфонового связующего // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 19–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-19-26.
3. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334. DOI: 10.31857/S0869587320040052.

4. Каблов Е.Н., Шульдешов Е.М., Петрова А.П., Лаптева М.А., Сорокин А.Е. Зависимость комплекса свойств звукопоглощающего материала типа ВЗМК от концентрации гидрофобизирующего состава на основе кремнийорганического герметика // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2 (59). С. 41–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-41-49.
5. 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: 19.03.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-92-99.
6. Постнов В.И., Вешкин Е.А., Макрушин К.В., Судьин Ю.И. Технологические особенности изготовления из полимерных композиционных материалов лопастей несущего винта для легкого вертолета // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 1 (70). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 17.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-82-92.
7. Хасков М.А., Мельников Д.А., Котова Е.В. Подбор температурно-временных режимов отверждения эпоксидных связующих с учетом масштабного фактора // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2017. № 10. С. 24–32.
8. Малышева Г.В., Мараховский П.С., Баринов Д.Я., Николаев Е.В. Оптимизация режимов отверждения стеклопластиков на основе эпоксидного связующего // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-94-103.
9. Шершак П.В., Сутубалов А.И., Яковлев Н.О., Шерстюк Ф.А. Стандарты по испытаниям полимерных композиционных материалов. Часть 2. Сжатие // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 2 (75). Ст. 12. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 28.06.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-149-166.
10. Хасков М.А. Расширение диаграммы «температура–время–превращение» с учетом теплофизических свойств компонентов для оптимизации режимов отверждения полимерных композиционных материалов // *Журнал прикладной химии*. 2016. № 4. С. 510–518.
11. Куцевич К.Е., Алексашин В.М., Петрова А.П., Антюфеева Н.В. Исследование кинетики реакций отверждения клеевых связующих // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2014. № 11. С. 27–31.
12. Антюфеева Н.В., Старков А.И. Влияние содержания галогенсодержащего олигомера в составе клеевого связующего ВСК-14-6 на кинетику процесса отверждения препрегов на разных наполнителях и сравнительный анализ кинетики отверждения препрегов на основе клеевого связующего ВСК-14-1 // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2022. № 5. С. 12–19.
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. 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.
15. Sharova I.A., Lukina N.F., Aleksashin V.M., Antuyfeeva N.V. Effect of modification with rubber on properties and process of curing of epoxy-rubber adhesives compositions // *Polymer Science. Series D*. 2016. Vol. 9. No. 4. P. 437–440.

References

1. Kablov E.N., Valueva M.I., Zelenina I.V., Khmelniyskiy V.V., Aleksashin V.M. Carbon plastics based on benzoxazine oligomers – perspective materials. *Trudy VIAM*, 2020, no. 1, paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 22, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
2. Kablov E.N., Kulagina G.S., Zhelezina G.F., Lonskii S.L., Kurshev E.V. Microstructure research of the unidirectional organoplastic based on Rusar-NT aramid fibers and epoxy-polysulfone binder. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 19–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-19-26.
3. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334. DOI: 10.31857/S0869587320040052.

4. Kablov E.N., Shuldeshov E.M., Petrova A.P., Lapteva M.A., Sorokin A.E. Dependence of complex of sound-proof VZMK type material properties on concentration of hydrophobizing composition on the basis of organosilicon sealant. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 41–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-41-49.
5. 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. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 19, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-92-99.
6. Postnov V.I., Veshkin E.A., Makrushin K.V., Sudin Yu.I. Technological features of manufacturing polymer composite materials of main rotor blades for a light helicopter. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 17, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-82-92.
7. Khaskov M.A., Melnikov D.A., Kotova E.V. Selection of temperature-time modes of curing epoxy binders taking into account the scale factor. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2017, no. 10, pp. 24–32.
8. Malysheva G.V., Marakhovskiy P.S., Barinov D.Ya., Nikolaev E.V. Optimization of the curing modes of fiber-glass based on epoxy binder. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 15, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-94-103.
9. Shershak P.V., Sutubalov A.I., Yakovlev N.O., Sherstyuk F.A. Standards test methods for polymer matrix composite materials. Part 2. Compression properties. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), paper no. 12. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 28, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-149-166.
10. Khaskov M.A. Expansion of the temperature-time-transformation diagram taking into account the thermophysical properties of the components for optimizing the curing modes of polymer composite materials. *Zhurnal prikladnoy khimii*, 2016, no. 4, pp. 510–518.
11. Kutsevich K.E., Aleksashin V.M., Petrova A.P., Antyufeeva N.V. Study of the kinetics of curing reactions of adhesive binders. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2014, no. 11, pp. 27–31.
12. Antyufeeva N.V., Starkov A.I. Influence of the content of halogen-containing oligomer in the composition of the adhesive binder VSK-14-6 on the kinetics of the curing process of prepregs on different fillers and a comparative analysis of the kinetics of curing of prepregs based on the adhesive binder VSK-14-1. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2022, no. 5, pp. 12–19.
13. Zhelezina G.F., Voynov S.I., Karimbaev T.D., Chernyshev A.A. Aramid organoplastics for aircraft engine fan housings. *Voprosy materialovedeniya*, 2017, no. 32 (90), pp. 153–165.
14. 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.
15. Sharova I.A., Lukina N.F., Aleksashin V.M., Antyufeeva N.V. Effect of modification with rubber on properties and process of curing of epoxy-rubber adhesives compositions. *Polymer Science. Series D*, 2016, vol. 9, no. 4, pp. 437–440.

Информация об авторах

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

Большаков Василий Александрович, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

Vasily A. Bolshakov, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 11.09.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 11.09.2024.
The article was submitted 11.09.2024; approved and accepted for publication after reviewing 11.09.2024.