

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-12-22

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ОТВЕРЖДЕНИЯ ЭПОКСИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО В ПРЕПРЕГЕ НА ОСНОВЕ РАВНОПРОЧНОЙ ТКАНИ МЕТОДАМИ МНОГОВАРИАНТНОЙ РЕГРЕССИИ

Н.С. Скуридина^{1,2}, В.А. Большаков¹, О.Н. Клименко¹, Д.Я. Баринов²

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

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия; bauman@bmstu.ru

Аннотация. Поэтапно рассмотрен подбор оптимальной кинетической модели отверждения расплавленного эпоксидного связующего в препреге на основе равнопрочной углеродной ткани. Показано влияние стадийности процесса и схемы протекания реакции на коэффициент детерминации экспериментальных и расчетных зависимостей. Методами многовариантной нелинейной регрессии проанализированы две функциональные зависимости между факторами и откликом согласно моделям Праута–Томпкинса и Аврамы–Ерофеева. Уточнены кинетические параметры реакции отверждения.

Ключевые слова: кинетика отверждения, дифференциальная сканирующая калориметрия, коэффициент корреляции, механизм реакции, степень конверсии, полимерный композиционный материал, регрессионный анализ

Для цитирования: Скуридина Н.С., Большаков В.А., Клименко О.Н., Баринов Д.Я. Исследование кинетики отверждения эпоксидного связующего в препреге на основе равнопрочной ткани методами многовариантной регрессии // Труды ВИАМ. 2025. № 11 (153). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-12-22.

Scientific article

INVESTIGATION OF THE KINETICS OF CURING OF AN EPOXY BINDER IN A PREPREG BASED ON AN EQUAL-STRENGTH FABRIC USING MULTIVARIATE REGRESSION METHODS

N.S. Skuridina^{1,2}, V.A. Bolshakov¹, O.N. Klimenko¹, D.Ya. Barinov²

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

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology)», Moscow, Russia; bauman@bmstu.ru

Abstract. The selection of the optimal kinetic model of curing of a molten epoxy binder in a prepreg based on an equal-strength carbon fabric is considered step by step. The influence of the process stages and the reaction flow pattern on the coefficient of determination of experimental and calculated dependences is shown. Using the methods of multivariate nonlinear regression, two functional dependencies between factors and response were analyzed according to the Prout–Tompkins and Avrami–Erofeev models. The kinetic parameters of the curing reaction have been refined.

Keywords: kinetics of curing, differential scanning calorimetry, correlation coefficient, reaction mechanism, conversion rate, polymer composite material, regression analysis

For citation: Skuridina N.S., Bolshakov V.A., Klimenko O.N., Barinov D.Ya. Investigation of the kinetics of curing of an epoxy binder in a prepreg based on an equal-strength fabric using multivariate regression methods. *Trudy VIAM*, 2025, no. 11 (153), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-12-22.

Введение

В настоящее время стратегически важной материаловедческой задачей является цифровизация технологии переработки полимерных композиционных материалов. Создание материалов нового поколения возможно лишь при полном контроле цикла от изготовления исходного сырья до готового к эксплуатации изделия. Такой многоуровневый процесс невозможен без применения компьютерных пакетов математического моделирования, позволяющего спрогнозировать тепловое состояние и деформацию материала и его компонентов в конструкции.

Для прогнозирования и оценки технологического процесса изготовления деталей из полимерных композиционных материалов в качестве объекта исследований можно представить пакет, состоящий из n -го количества слоев препрега [1–4]. Важной задачей является подбор оптимального температурно-временного режима отверждения данной формовочной композиции. Для оценки свойств и качества материала используют методы термического анализа. Чаще всего величину тепловыделений реакции отверждения связующего в препреге регистрируют методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). По полученной экспериментальной кривой также оценивают характеристические температуры и скорость полимеризации связующего в препреге [5–9]. Расчет кинетических параметров реакции отверждения может проводиться двумя способами. В первом случае используется безаприорный подход – без выбора определенной кинетической модели. Во втором случае расчет проводится по выбранной кинетической модели. В основе такого подхода лежит метод многовариантной регрессии. Регрессионный анализ позволяет получить представление о виде функциональной зависимости между факторами и откликом [10–12].

Цель работы – подбор наиболее подходящей модели, определяющей реакцию отверждения эпоксидного связующего в препреге полимерного композиционного материала.

Материалы и методы

Объектом исследования является препрег углепластика на основе расплавленного эпоксидного связующего, отверждаемого ароматическим отвердителем, и равнопрочной углеродной ткани саржевого плетения с частотой перекрытия основы и утка 2/2. Углепластики российских производителей на основе данных компонентов получили широкое применение при изготовлении силовых деталей в конструкции летательного аппарата, рабочих лопаток вентилятора и лопаток спрямляющего аппарата. Они позволяют изготовить изделия меньшей массы, соизмеримой с массой изделий из некоторых алюминиевых сплавов, но с большей эффективной прочностью и жесткостью [13–15].

Количество теплоты, выделяющееся при отверждении расплавленного эпоксидного связующего, фиксировали методом ДСК. Измерения проводили в среде воздуха в диапазоне температур от 20 до 310 °С при трех скоростях нагрева. Образцы с различной массой помещали в измерительную ячейку прибора в алюминиевых тиглях. Массу образца подбирали таким образом, чтобы нивелировать некорректные тепловые эффекты на ДСК-кривой, связанные с тепловой инерцией. Масса образцов составила 21,04; 14,56 и 7,71 мг для скоростей нагрева 5, 10 и 20 °С/мин соответственно.

Для оценки кинетики отверждения эпоксидного связующего в препреге, подбора наиболее корректной регрессионной модели и расчета кинетических параметров реакции использовали компьютерный пакет программ математического моделирования.

Расчеты в программном обеспечении проводили на основе экспериментальных зависимостей, полученных методом ДСК.

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

Результаты и обсуждение

Регрессионную модель, наиболее точно описывающую процесс отверждения расплавленного эпоксидного связующего в препреге углепластика, выбирали в программе кинетического анализа термоаналитических данных. Для этого экспериментальные ДСК-кривые (рис. 1) последовательно загружали в программное обеспечение.

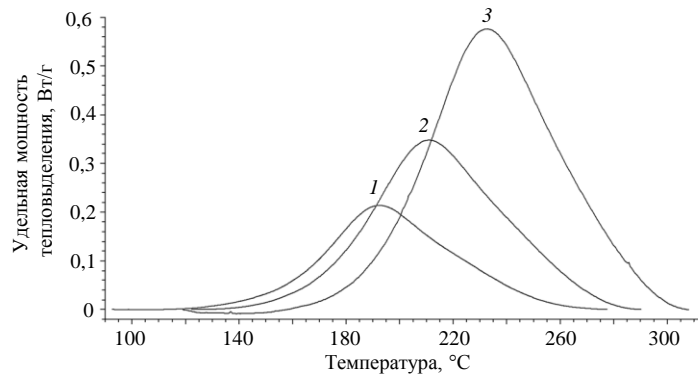


Рис. 1. Удельная мощность тепловыделения реакции отверждения эпоксидного связующего в препреге при скорости нагрева 5 (1), 10 (2) и 20 °С/мин (3)

Отверждение эпоксидных олигомеров характеризуется реакциями автокатализа и зародышеобразования. При этом процесс может быть одно-, двух- и трехстадийным. Модель отверждения определяется последовательной, параллельной и разветвленной схемами с возможностью присутствия конкурирующих реакций.

На первом этапе проанализированы данные без выбора определенной кинетической модели процесса. Такой метод позволяет выявить стадийность реакции отверждения, присутствие в кинетической модели конкурирующих стадий и тип протекающей реакции. Недостатком метода является возможность определения лишь энергии активации и предэкспоненциального множителя. Однако данный анализ модели по Фридману (рис. 2) позволяет ускорить дальнейший выбор функциональной зависимости, описываемой моделью множественной нелинейной регрессии [10, 11, 16].

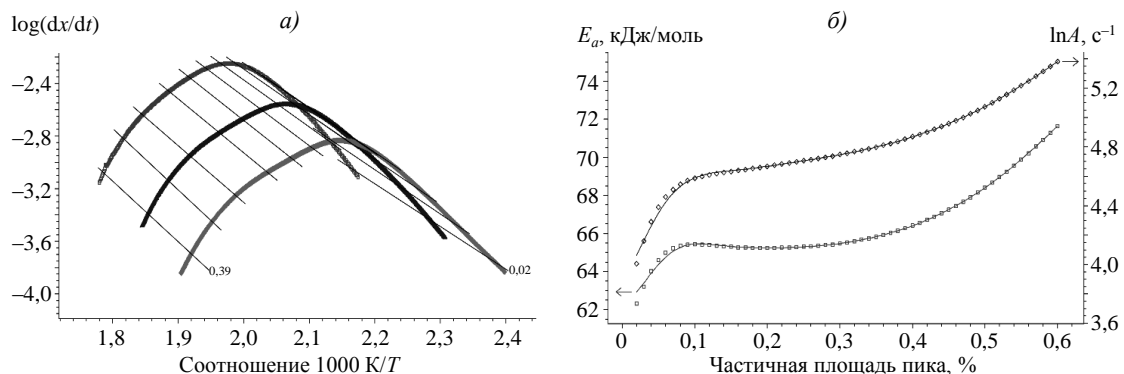


Рис. 2. Безмодельный анализ кинетической модели отверждения препрега по методу Фридмана: *a* – изоконверсионные кривые (T – температура); *б* – зависимость энергии активации (E_a) и предэкспоненциального множителя ($\ln A$) от степени отверждения

Угол наклона каждой группы параллельных изоконверсионных ДСК-кривых на термограмме, отражающей зависимость логарифма скорости реакции от обратной температуры (рис. 2, *a*), определяет энергию активации стадии. На графике зависимости энергии активации от степени конверсии (рис. 2, *b*) также наблюдается непостоянство энергии в процессе отверждения системы. Полученные данные свидетельствуют о многостадийности процесса, т. е. протекании реакции в более чем одну стадию. Анализ по Фридману показывает, что в процессе отверждения угол наклона экспериментально полученных ДСК-кривых (рис. 2, *a*) больше, чем угол наклона прямой, соответствующей степени превращения, что свидетельствует о протекании реакции с ускорением (автокатализ, зародышеобразование).

Для уточнения кинетических параметров реакции осуществляется разделение ДСК-кривой как минимум на два пика для каждой скорости нагрева. Каждая экспериментальная зависимость, определенная при скоростях нагрева 5, 10 и 20 °С/мин, с помощью специального программного обеспечения разделяется на пики различного вида, которые характеризуют отдельно протекающие реакции химического отверждения. В первом случае выделяют две стадии и проводится анализ каждого процесса реакции по модели Праута–Томпкинса реакции n -го порядка с автокатализом. Во втором случае на кривой определяют три перекрывающихся пика и применяют функцию множественной нелинейной регрессии, описывающую процесс зародышеобразования по Авраами–Ерофееву.

Задачей данных расчетов является нахождение набора кинетических параметров, которые сводят к минимуму сумму квадратов отклонений расчетных и экспериментальных данных. Смоделированная ДСК-кривая строится на основе решения системы дифференциальных уравнений и зависит от значений искомых данных. Для подбора параметров реакции отверждения методом многовариантной нелинейной регрессии вводится следующее допущение – кинетическая модель верна для различных скоростей нагрева. Такой подход позволяет получить достаточную степень надежности результатов. Обобщенный расчет в программном обеспечении осуществляется на основе кинетических параметров выделенных стадий, определенных по простому механизму.

Выбирается модель, подчиняющаяся уравнению Праута–Томпкинса с автоускорением реакции n -го порядка (формулы (1.1) и (1.2)). Теория данных авторов учитывает пересечения и вероятность обрыва линейных разветвляющихся цепей, подходит для описания процессов, протекающих согласно экспоненциальному закону на ранних стадиях периода ускорения [17, 18]:

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = -Ae^{\frac{E_a}{RT}} f(\alpha, \rho), \quad (1.1)$$

$$f(\alpha, \rho) = \alpha^n \rho^a, \quad (1.2)$$

где α – концентрация исходного вещества, моль; τ – время, с; A – предэкспоненциальный множитель, с⁻¹; E_a – энергия активации отверждения, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – абсолютная температура, К; $f(\alpha, \rho)$ – функция, определяющая вид кинетического уравнения; ρ – концентрация продукта, моль; n – порядок реакции; a – показатель степени.

Первый вариант последовательной реакции химического отверждения представлен на рис. 3. Результаты расчета обобщенной модели отражены на рис. 4, на соответствующих ДСК-кривых видна степень сходимости экспериментальных и смоделированных зависимостей. В табл. 1 приведены значения кинетических параметров для каждой протекающей стадии процесса. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,999132 \approx 1$,

что подтверждает высокую точность выбранной модели, количество выделенных пиков и последовательность реакции отверждения.

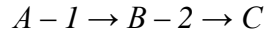


Рис. 3. Схема двухстадийной модели отверждения с последовательными реакциями: *A* – исходный компонент; *B* – промежуточный продукт; *C* – конечный продукт

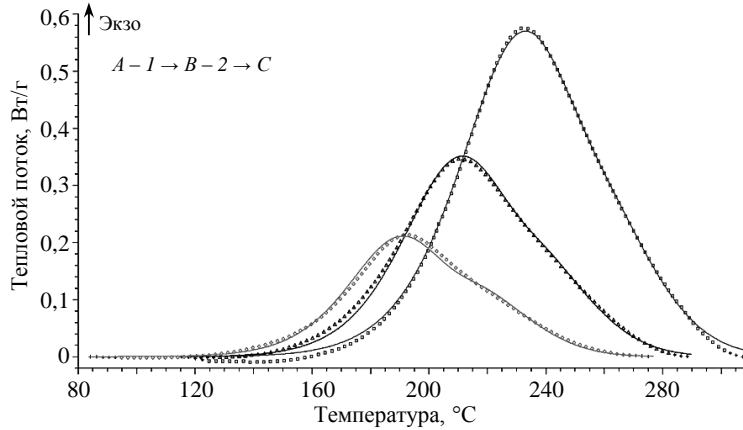


Рис. 4. Тепловыделение при полимеризации исследуемого препрега при скорости нагрева 5 (◇), 10 (△) и 20 °C/мин (□) (двухстадийная модель с последовательными реакциями): сплошная линия – смоделированный процесс отверждения

Таблица 1

Кинетические параметры реакции отверждения полимерного композиционного материала (двухстадийная модель с последовательными реакциями)

Кинетический параметр	Значения параметров для стадии	
	1	2
Энергия активации E_a , кДж/моль	59,3319	74,0630
Предэкспоненциальный множитель $\ln A$, c^{-1}	4,5653	5,5701
Порядок реакции n	0,7678	1,1379
Показатель степени a	0,4928	$4,76 \cdot 10^{-5}$
Коэффициент детерминации R^2	0,999132	

По экспериментальным данным, представленным на рис. 1, можно сделать вывод о монотонной зависимости площади пика ДСК-кривой от скорости нагрева. Такая картина позволяет предположить, что отверждение протекает с присутствием конкурирующих реакций. Данная схема процесса также характерна для связующих на основе эпоксидных смол, содержащих несколько видов аминных отвердителей [11, 19].

Двухстадийные модели, имеющие разветвленный и параллельный характер отверждения, представлены на рис. 5. При одной и той же концентрации исходного компонента в результате параллельно протекающих химических процессов образуются различные конечные продукты. Обобщенные зависимости тепловыделений от температуры при различной скорости нагрева по рассмотренным схемам отражены на рис. 6. Отмечено, что сходимость экспериментальных и расчетных кривых меньше, чем при последовательной двухстадийной реакции отверждения. В табл. 2 и 3 приведены значения кинетических параметров для каждой протекающей стадии соответствующего процесса.

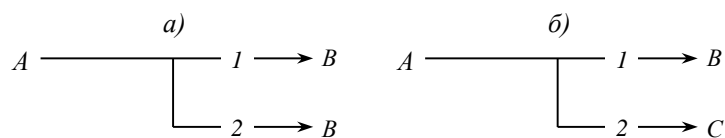


Рис. 5. Схемы двухстадийной модели отверждения с параллельными (а) и конкурирующими (б) реакциями: А – исходный компонент; В, С – конечный продукт

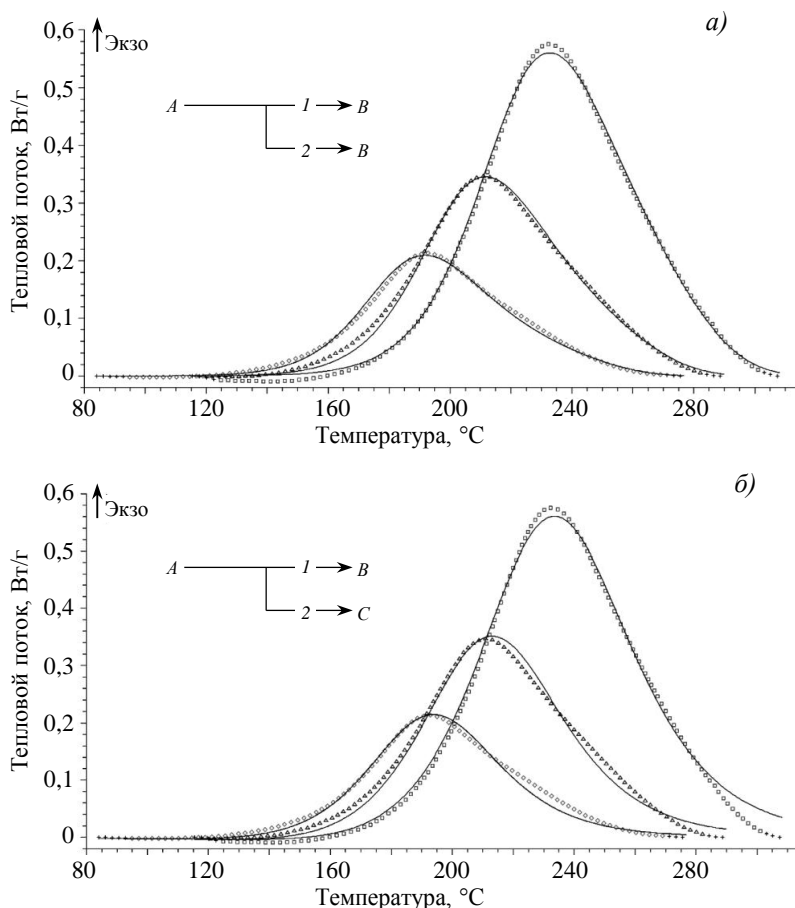


Рис. 6. Тепловыделение при полимеризации исследуемого препрега при скорости нагрева 5 (◇), 10 (△) и 20 °С/мин (□) (двухстадийная модель с параллельными (а) и конкурирующими (б) реакциями): сплошная линия – смоделированный процесс отверждения

Таблица 2

Кинетические параметры реакции отверждения полимерного композиционного материала (двухстадийная модель с параллельными реакциями)

Кинетический параметр	Значения параметров для стадии	
	1	2
Энергия активации E_a , кДж/моль	101,3686	58,1793
Предэкспоненциальный множитель $\ln A$, c^{-1}	8,0993	4,3301
Порядок реакции n	1,0608	1,9582
Показатель степени a	0,6929	0,5440
Коэффициент детерминации R^2	0,998873	

Таблица 3

Кинетические параметры реакции отверждения полимерного композиционного материала (двухстадийная модель с конкурирующими реакциями)

Кинетический параметр	Значения параметров для стадии	
	1	2
Энергия активации E_a , кДж/моль	60,5946	31,3500
Предэкспоненциальный множитель $\ln A$, с^{-1}	4,5455	-0,3023
Порядок реакции n	1,5469	42,9807
Показатель степени a	0,4899	$1,6192 \cdot 10^{-4}$
Коэффициент детерминации R^2	0,997160	

Простой механизм реакции отверждения по одностадийной модели Праута–Томпкинса n -го порядка с автоускорением (формула (1.2)), представлен на рис. 7. С учетом обобщенных зависимостей на рис. 8, следует отметить, что снижение порядка реакции влияет на форму ДСК-кривых, график становится менее пологим при неизменном положении точек начала и максимума пика. Коэффициент детерминации смоделированных и экспериментальных процессов уменьшается ($R^2 = 0,995155$), при этом обеспечивается достаточная степень надежности дальнейших расчетов. В табл. 4 приведены значения кинетических параметров данной реакции.

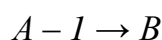


Рис. 7. Схема одностадийной модели отверждения: A – исходный компонент; B – конечный продукт

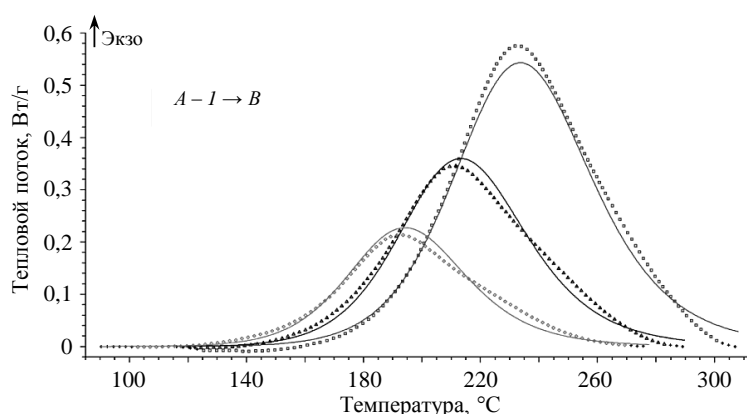


Рис. 8. Тепловыделение при полимеризации исследуемого препрега при скорости нагрева 5 (\diamond), 10 (\triangle) и 20 $^\circ\text{C}/\text{мин}$ (\square) (одностадийная модель): сплошная линия – смоделированный процесс отверждения

Таблица 4

Кинетические параметры реакции отверждения полимерного композиционного материала (одностадийная модель)

Кинетический параметр	Значения параметров для стадии 1
Энергия активации E_a , кДж/моль	61,2643
Предэкспоненциальный множитель $\ln A$, с^{-1}	4,6162
Порядок реакции n	1,5060
Показатель степени a	0,4934
Коэффициент детерминации R^2	0,995155

Рассмотрена кинетическая модель, описывающая процесс зародышеобразования для необратимых гетерофазных реакций согласно уравнению Авраами–Ерофеева n -го порядка [17]:

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = -Ae^{\frac{E_a}{RT}} f(\alpha, \rho), \quad (2.1)$$

$$f(\alpha, \rho) = d\alpha(-\ln\alpha)^{(d-1)/d}, \quad (2.2)$$

где d – коэффициент процесса роста ядер.

Величина порядка n , согласно Авраами, позволяет понять характер протекания процесса полимеризации, место его локализации (в объеме или на границе раздела) и фазовую кинетику. Использование модели обусловлено сродством между процессами роста зародышей в кристаллах и реакциями, протекающими при сшивке полимерной структуры. При этом изменение показателя порядка n от 0 до >3 показывает интенсивность автокатализа. Процесс автоускорения в данном случае определяется наличием гель-эффекта и микрогелевым механизмом [20].

Рассмотрен последовательный механизм реакции по модели Авраами (формула (2.2)), протекающий в три стадии по схеме, представленной на рис. 9. Результаты расчета приведены в виде обобщенной модели процесса на рис. 10. Соответствующие ДСК-кривые показывают сходимость экспериментальных и смоделированных зависимостей. Коэффициент детерминации ($R^2 = 0,997307$) меньше значения показателя, полученного при расчете по двухстадийной последовательной модели реакции согласно уравнению Праута–Томпкина (формула (1.2)). В табл. 5 приведены значения кинетических параметров для каждой протекающей стадии процесса.

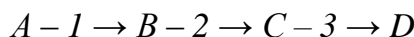


Рис. 9. Схема трехстадийной модели с последовательными реакциями отверждения: A – исходный компонент; B, C – промежуточный продукт; D – конечный продукт

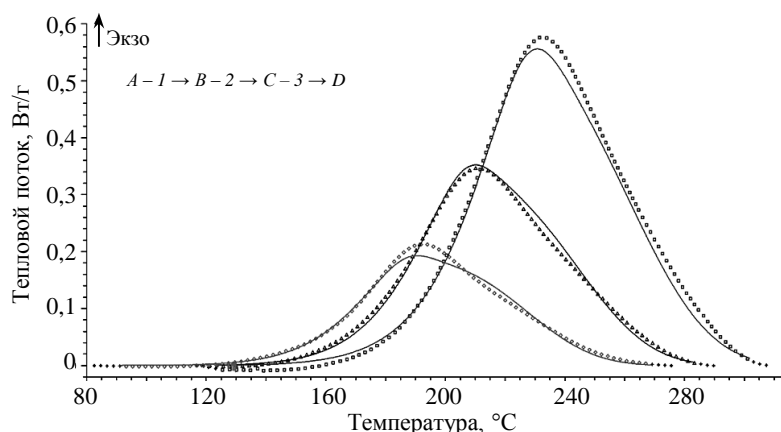


Рис. 10. Тепловыделение при полимеризации исследуемого препрега при скорости нагрева 5 (\diamond), 10 (\triangle) и 20 $^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ (\square) (трехстадийная модель с последовательными реакциями): сплошная линия – смоделированный процесс отверждения

Кинетические параметры реакции отверждения полимерного композиционного материала (трехстадийная модель с последовательными реакциями)

Кинетический параметр	Значения параметров для стадии		
	1	2	3
Энергия активации E_a , кДж/моль	56,5549	270,2566	76,9647
Предэкспоненциальный множитель $\ln A$, c^{-1}	4,0931	45,6506	5,9880
Коэффициент процесса роста ядер d	1,9344	819,8989	0,7929
Коэффициент детерминации R^2	0,997307		

Заключения

Проанализирована кинетика отверждения препрега на основе расплавленного эпоксидного связующего и равнопрочной углеродной ткани саржевого плетения. Показано влияние выбора регрессионной модели и вариации количества выделенных стадий протекающих химических реакций на степень сходимости расчетных и экспериментальных зависимостей. Наибольший коэффициент детерминации определен для двухстадийной последовательной схемы отверждения согласно функции n -го порядка с автоускорением, подчиняющейся уравнению Праута–Томпкинса ($R^2 = 0,999132$). Меньшей точностью обладают модели отверждения с присутствием параллельных и конкурирующих реакций ($R^2 = 0,998873$, $R^2 = 0,997160$). При рассмотрении кинетической модели зародышеобразования n -го порядка по Авраами–Ерофееву и выделении трех пиков различных профилей последовательный механизм химического отверждения является менее достоверным ($R^2 = 0,997307$), чем при выделении двух последовательных стадий. Следует отметить, что при выборе простой схемы реакции коэффициент детерминации составляет $R^2 = 0,995155$.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 7–17.
2. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // XXI Менделеевский съезд по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 3. С. 24.
3. Каблов Е.Н. Материалы – основа любого дела // *Деловая слава России*. 2013. № 2 (40). С. 4–9.
4. Амирова Л.М., Андрианова К.А., Амиров Р.Р. Эпоксидные смолы и композиты на их основе: учеб. пособие. Казань: КНИТУ–КАИ, 2021. 216 с.
5. Ситникова В.Е., Пономарева А.А., Успенская М.В. Методы термического анализа: практикум. СПб.: Университет ИТМО, 2021. 152 с.
6. Большаков В.А., Антюфеева Н.В. Оценка модели процесса отверждения клевого связующего в препреге // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 4 (73). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 28.01.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-66-77.
7. Терехов И.В., Ткачук А.И., Донецкий К.И., Караваев Р.Ю. Технологические и эксплуатационные характеристики и области применения низковязкого эпоксидного связующего ВСЭ-62 с повышенной жизнеспособностью // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 2 (63). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.02.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-43-50.
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: 28.01.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-94-103.
9. Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение терморезистивных связующих для изготовления полимерных композиционных материалов методами безавтоклавного формования // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.02.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.

10. Киселева Д.В., Садыкова Н.О. Кинетический анализ термогравиметрических данных ископаемых костных остатков // Труды Института геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого. 2010. № 157. С. 336–339.
11. 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: 10.02.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-12-12.
12. Халафян А.А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных. 3-е изд. М.: Бином-Пресс, 2007. 512 с.
13. Аношкин А.Н., Зуйко В.Ю., Шипунов Г.С., Третьяков А.А. Технологии и задачи механики композиционных материалов для создания лопатки спрямляющего аппарата авиационного двигателя // Вестник ПНИПУ. Механика. 2014. № 4. С. 5–44. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.4.01.
14. Мишкин С.И. Применение углепластиков в конструкциях беспилотных аппаратов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 5 (111). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.02.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-87-95.
15. Гуняев Г.М., Железина Г.Ф., Кривонос В.В., Румянцев А.Ф. Полимерные композиционные материалы в конструкциях летательных аппаратов // Авиационные материалы и технологии. 2002. № S1. С. 12–20.
16. Амирова Л.Р., Хамидуллин О.Л., Залялова Г.М., Амирова Л.М. Оценка кинетических параметров процесса отверждения эпоксидангидридных систем методом ДСК // Известия Академии наук. Серия химическая. 2017. № 3. С. 483–487.
17. Абиев Р.Ш., Бибик Е.Е., Власов Е.А. Новый справочник химика и технолога. Электродные процессы. Химическая кинетика и диффузия. Коллоидная химия. СПб.: Профессионал, 2004. 838 с.
18. Янг Д. Кинетика разложения твердых веществ. М.: Мир, 1969. 263 с.
19. Хасков М.А. Расширение диаграммы температура–время–превращение с учетом теплофизических свойств компонентов для оптимизации режимов отверждения полимерных композиционных материалов // Журнал прикладной химии. 2016. Т. 89. № 4. С. 510–518.
20. Иржак Т.Ф., Межиковский С.М., Иржак В.И. О физическом смысле уравнения Авраами в реакциях отверждения олигомеров // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. 2008. Т. 50. № 8. С. 1563–1565.

References

1. Kablov E.N. The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period to 2030. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 7–17.
2. Kablov E.N. The Role of Fundamental Research in the Creation of Next-Generation Materials. *XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 3, p. 24.
3. Kablov E.N. Materials – the Foundation of Any Business. *Delovaya slava Rossii*, 2013, no. 2 (40), pp. 4–9.
4. Amirova L.M., Andrianova K.A., Amirov R.R. *Epoxy Resins and Composites Based on Them*: textbook. Kazan: KNITU–KAI, 2021, 216 p.
5. Sitnikova V.E., Ponomareva A.A., Uspenskaya M.V. *Methods of Thermal Analysis*: workshop. St. Petersburg: ITMO University, 2021, 152 p.
6. 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: January 28, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-66-77.
7. Terekhov I.V., Tkachuk A.I., Donetsky K.I., Karavaev R.Yu. Technological and operational characteristics of the VSE-62 low-viscosity epoxy resin with increased pot life and its application. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 05, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-43-50.
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: January 28, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-94-103.

9. Tkachuk A.I., Donetsky K.I., Terekhov I.V., Karavaev R.Yu. The use of thermosetting matrices for the manufacture of polymer composite materials by the non-autoclave molding methods. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 05, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
10. Kiseleva D.V., Sadykova N.O. Kinetic analysis of thermogravimetric data of fossil bone remains. *Proceedings of the A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry*, 2010, no. 157, pp. 336–339.
11. Chutskova E.Yu., Aleksashin V.M., Barinov D.Ya., Demytyeva 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: February 10, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-12-12.
12. Khalafyan A.A. *STATISTICA 6. Statistical analysis of data*. 3rd ed. Moscow: Binom-Press, 2007, 512 p.
13. Anoshkin A.N., Zuyko V.Yu., Shipunov G.S., Tretyakov A.A. Technologies and problems of mechanics of composite materials for creating a straightener blade for an aircraft engine. *Vestnik PNIPU. Mekhanika*, 2014, no. 4, pp. 5–44. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.4.01.
14. Mishkin S.I. Application of carbon fiber plastics in constructions of pilotless devices (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 5 (111), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 18, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-87-95.
15. Gunyaev G.M., Zhelezina G.F., Krivonos V.V., Rumyantsev A.F. Polymer composite materials in aircraft structures. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2002, no. S1, pp. 12–20.
16. Amirova L.R., Khamidullin O.L., Zalyalova G.M., Amirova L.M. Assessment of kinetic parameters of the curing process of epoxyanhydride systems by DSC. *Izvestiya Akademii nauk. Seriya khimicheskaya*, 2017, no. 3, pp. 483–487.
17. Abiev R.Sh., Bibik E.E., Vlasov E.A. *New reference book for chemist and technologist. Electrode processes. Chemical kinetics and diffusion. Colloidal chemistry*. St. Petersburg: Professional, 2004, 838 p.
18. Young D. *Kinetics of Decomposition of Solids*. Moscow: Mir, 1969, 263 p.
19. Khaskov M.A. Expansion of the Temperature–Time–Transformation Diagram Taking into Account the Thermophysical Properties of Components for Optimizing the Curing Modes of Polymer Composite Materials. *Zhurnal prikladnoy khimii (Journal of Applied Chemistry)*, 2016, vol. 89, no. 4, pp. 510–518.
20. Irzhak T.F., Mezhevikov S.M., Irzhak V.I. On the Physical Meaning of the Avrami Equation in Oligomer Curing Reactions. *Ysokomolekulyarnye soedineniya, Series B*, 2008, vol. 50, no. 8, pp. 1563–1565.

Информация об авторах

Скуридина Наталья Степановна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru; студент, МГТУ им. Н.Э. Баумана, bauman@bmstu.ru

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

Клименко Оксана Николаевна, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Барин Дмтрий Яковлевич, доцент, к.т.н., МГТУ им. Н.Э. Баумана, bauman@bmstu.ru

Information about the authors

Natalia S. Skuridina, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru; Student, Bauman Moscow State Technical University, bauman@bmstu.ru

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

Oksana N. Klimenko, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Dmitry Ya. Barinov, Associate Professor, Candidate of Sciences (Tech.), Bauman Moscow State Technical University, bauman@bmstu.ru

Статья поступила в редакцию 16.04.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 22.04.2025.

The article was submitted 16.04.2025; approved and accepted for publication after reviewing 22.04.2025.