

УДК 532.133
PACS 47.57.Qk

К оценке времени отверждения эпоксидного олигомера в ходе процесса неизотермической полимеризации

С. В. Русаков[†], В. Г. Гилев[‡]

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

[†]email: rusakov@psu.ru

[‡]email: gvg@psu.ru

Представлены результаты экспериментального исследования и численного моделирования процесса отверждения эпоксидного связующего в условиях неизотермической полимеризации. Объект исследования: двухкомпонентная композиция «холодного отверждения»: эпоксидная смола L и отвердитель EPH 161, сертифицированные в качестве связующего для композиционных материалов аэрокосмического назначения. Измерения выполнены на ротационном реометре Physica MCR 501 (Anton Paar, Австрия) в режиме осцилляций в условиях программируемого изменения температуры. В качестве основной модели использовалась задача Коши для обыкновенного дифференциального уравнения, описывающая поведение олигомера в ходе процесса отверждения. Значения материальных параметров, необходимых для выполнения расчетных операций, получены реологическим методом, анализируя зависимость вязкости связующего от времени полимеризации и скорости изменения температуры. Приводятся оценки параметров модели, полученные в результате обработки натуральных экспериментов. Определены эффективные значения кинетических параметров, при которых расчетное время потери текучести хорошо согласуется с экспериментальным.

Ключевые слова: эпоксидная смола; вязкость; отверждение; кинетическая модель

Поступила в редакцию 29.07.2021; после рецензии 02.08.2021; принята к опубликованию 02.08.2021

To estimate the curing time of epoxy oligomer during nonisothermal polymerization process

S. V. Rusakov[†], V. G. Gilev[‡]

Perm State University, Perm, Russia

[†]email: rusakov@psu.ru

[‡]email: gvg@psu.ru

The results of an experimental study and numerical modeling of the curing process of an epoxy binder under conditions of non-isothermal polymerization are presented. Object of research: two-component composition of "cold curing": epoxy resin L and hardener EPH 161, certified as a binder for aerospace composite materials. The measurements were performed on a Physica MCR 501 rotary rheometer in the oscillation mode under conditions of a programmable temperature change. The Cauchy problem for an ordinary differential equation describing the behavior of an oligomer during the curing process was used as the main model. The values of the material parameters necessary for performing the calculation operations were obtained by the rheological method, analyzing the dependence of the binder viscosity on the polymerization time and the rate of temperature change. Estimates of the model parameters obtained as a result of processing full-scale experiments are

given. The effective values of the kinetic parameters are determined, at which the calculated yield loss time is in good agreement with the experimental one.

Keywords: epoxy resin; viscosity; curing; kinetic model

Received 29.07.2021; revised 02.08.2021; accepted 02.08.2021

doi: 10.17072/1994-3598-2021-3-30-36

1. Введение

Эпоксидные клеевые композиции получили широкое распространение благодаря высоким прочностным свойствам, хорошей адгезией к различным материалам, стойкости к воздействию внешних факторов и малой усадке. При практическом использовании таких композиций и композиционных материалов на их основе основными параметрами, определяющими «жизнеспособность» связующего и время его отверждения, являются температурные зависимости вязкости и степени конверсии, так как от этого зависит длительность формирования конечного продукта. Существенно, что процесс полимеризации конструкции может происходить как в изотермических, так и в неизотермических условиях.

В общей постановке кинетика отверждения реакционноспособных олигомеров является одной из центральных проблем, решение которой позволяет, во-первых, судить о химизме процесса; во-вторых, ввести количественные параметры для сравнения между собой различных материалов и, в-третьих, давать обоснованные прогнозы производительности и эффективности реальных технологических процессов.

Здесь возможны два существенно различных подхода: микрокинетический и макрокинетический. В первом случае прямыми экспериментальными методами судят об изменении концентрации тех или иных реакционноспособных групп. Так традиционно степень отверждения оценивают по содержанию гель-фракции, которую определяют экстракцией отвержденных связующих органическими растворителями [1]. Однако этот показатель не чувствителен к наличию в полимерных цепях реакционных центров. К этому подходу близки хроматографические методы анализа, основанные на различной растворимости веществ в подвижной и неподвижной фазах. Для определения в полимерной матрице количества реакционноспособных групп используют ИК-анализ [3], методы ЯМР [4], спектроскопию комбинационного рассеяния света [5]. При наличии в системе нескольких компонентов такими методами можно определять степень превращения каждого из них, например, эпоксидной смолы и отвердителя [6], что позволяет описать протекающие в системе реакции, но не дает возможности определить значение показателя степени

отверждения для системы в целом. Другими словами, микрокинетические методы дают наглядные результаты, но далеко не всегда однозначны для оценки глубины и степени отверждения.

Более эффективным с точки зрения практики является макрокинетический подход, основанный на наблюдении изменения во времени того или иного интегрального параметра, отражающего всю совокупность химических превращений, происходящих при полимеризации олигомера. Для этого используются различные физико-химические методы, в том числе реологический анализ. С одной стороны, измерение реологических свойств реакционной массы в процессе полимеризации – это метод слежения за ходом процесса. С другой, характеристики реологических свойств материала позволяют получать дополнительную информацию о процессах образования разветвленных и пространственных структур и непосредственно определять динамическое положение гелевой точки. Если ИК-спектроскопия (и другие спектроскопические методы) позволяют определить степень превращения компонентов, ничего не говоря о возможности протекания дальнейшей реакции, то реологический метод характеризуют сам процесс отверждения. Однако он не дает прямой возможности оценить конверсию компонентов, но тем не менее позволяет определить ряд практически важных характеристик процесса полимеризации.

Исследование процессов изотермического отверждения эпоксидных олигомеров реологическим методом было выполнено в целом ряде работ [7–12]. Так, в работе [8] определена энергия активации и рассмотрена применимость различных моделей для описания зависимости вязкости от времени отверждения. В работе [9] установлены кинетические характеристики процесса отверждения олигомерной смолы ЭД-20. Получено уравнение, устанавливающее изменение вязкости как функции средней молярной массы, плотности, массовой доли отвержденного продукта. Математические модели кинетики отверждения терморезистивных смол и увеличения вязкости в процессе отверждения обобщены в работе [10], основные выводы в которой базируются на анализе единиц измерения. Математическая модель реакции отверждения ЭД-20 с отвердителем ТЭАТ-1 рассмотрена в работах [11–12]. Модель учитывает изменение концентраций фрагментов молекул реакционной смеси в процессе отверждения.

Обычно в реальном технологическом режиме отверждение олигомеров и их композиций проводят не при постоянной, а при изменяющейся температуре, как правило, возрастающей. Это обусловлено рядом причин. Даже если выбрана какая-то постоянная температура отверждения, все равно реальный химический процесс оказывается неизотермическим. Это особенно актуально при развёртывании и полимеризации изделий из композитных материалов в условиях открытого космоса [13]. Поэтому проблема разработки критериев оценки поведения материала в неизотермическом режиме отверждения остается актуальной. Она может основываться как на полном описании изменений свойств материала в неизотермическом режиме, так и на оценке той или иной характеристике материала, определяющей процесс его отверждения или его технологические показатели. Общий подход к этой проблеме рассмотрен в работе [14].

В настоящей работе предложен метод оценки времени, в течение которого исходный эпоксидный олигомер переходит из жидкой фазы в гель-фракцию, при которой вязкость образца стремится к бесконечности. Проведено сравнение расчетной методики с экспериментом.

2. Объект исследования, детали эксперимента

В экспериментах использовалась эпоксидная композиция «холодного отверждения» – эпоксидная смола L и отвердитель EPH 161, сертифицированные к применению в конструкционных композиционных материалах авиационного назначения. Смесь готовилась в весовом соотношении эпоксидной смолы к отвердителю в соотношении 4:1, рекомендованном производителем. После приготовления смесь тщательно смешивалась в течение 1–2 мин электромеханическим смесителем и дополнительно 5–10 мин в ультразвуковой ванне Digital Ultrasonic Cleaner CD 4820 на частоте 40 кГц при комнатной температуре. Последняя операция способствует также дегазации смеси. Измерения массы растворов и их компонентов, необходимые для расчета концентрации смеси, выполнялись с помощью аналитических весов ЛВ-210А 2-го класса точности, абсолютная погрешность измерения которых составляла ± 0.4 мг.

Реологические измерения выполнены на ротационном реометре Physica MCR 501. Во всех измерениях использовалась система «конус–плита». Диаметр конуса $d = 25$ мм, угол раствора конуса $\alpha = 1^\circ$. Используемая геометрия обеспечивает однородность градиента скорости сдвига в измерительном зазоре. С целью верификации данных отдельные измерения проводились с конусом диаметром 50 мм (угол раствора 1°). Для поддержания и изменения температурного режима использовалось специальное температурное устройство Н-PTD 200 на основе эффекта Пельтье. В ходе эксперимента на

рабочую поверхность плиты реометра помещалось около 0.07 мл раствора. Толщина слоя раствора по его внешнему радиусу составляла 0.047 мм, что обеспечивало быстрое установление рабочей температуры в образце даже в условиях тепловыделения, обусловленного реакцией полимеризации.

Основные измерения выполнены в условиях сдвигового деформирования по гармоническому закону с частотой 1 Гц в режиме контроля величины деформации, что позволяет оценить не только вязкие, но и вязкоупругие характеристики образцов. Для минимизации тепловых эффектов, обусловленных сдвиговым течением, измерения проводились по следующей программе: через равные промежутки времени снималась серия значений параметров в экспериментах с постоянной амплитудой сдвигового деформирования. После этого выжидалось некоторое время (система находилась в покое) и вновь повторялась серия измерений. Процесс продолжался до предельно допустимого значения касательных напряжений, используемого реометра (56 кПа).

В экспериментах был реализован как изотермический процесс, так и неизотермический, в ходе которого температура T увеличивалась со временем согласно закону

$$T(t) = \begin{cases} T_0, & 0 \leq t \leq t_0, \\ T_0 + \alpha(t - t_0), & t_0 < t \leq t_1, \\ T_1 = T_0 + \alpha(t_1 - t_0), & t > t_1. \end{cases} \quad (1)$$

В серии экспериментов использовали значения $T_0 = 25^\circ\text{C}$, $T_1 = 50^\circ\text{C}$, скорость изменения температуры $\alpha = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6^\circ\text{C}/\text{мин}$. Отметим, что времени $t \in [0, t_0]$ соответствует период изотермического режима полимеризации, а при $t_0 = 0$ сразу начинается неизотермический этап.

3. Результаты измерений

Процесс нарастания вязкости в ходе отверждения эпоксидных смол носит сложный характер, показан на рис. 1, где представлен ряд результатов при значении $t_0 = 0$.

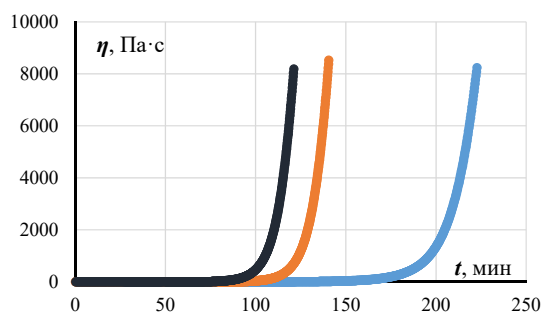


Рис. 1. Зависимость вязкости от времени полимеризации и скорости нагрева. Слева направо: $\alpha = 0.5; 0.3; 0.1^\circ\text{C}/\text{мин}$

Начальные участки изменения вязкости можно аппроксимировать уравнением кинетического типа $\eta = \eta_0 \exp(kt)$, где η_0 – начальная вязкость при данной температуре, k – константа, характеризующая кинетику нарастания вязкости, t – время [14]. Такая зависимость удобна для проведения практических расчетов на начальном этапе полимеризации. Однако ее использование не позволяет определить время гелеобразования, которое формально отвечает условию $\eta \rightarrow \infty$, поскольку экспоненциальная функция не предполагает существования такого предела. С другой стороны, часто практический интерес представляет не весь диапазон изменения вязкости, а лишь время перехода из режима течения вязкого в режим гелеобразования t_* . Таким образом, по достижении некоторого критического значения времени от начала полимеризации для описания процесса необходима асимптотическая функция. Один из способов определения максимально достижимого значения вязкости материала был предложен в работе [15]. Он состоит в построении зависимости обратной вязкости $1/\eta$ от времени на конечных стадиях отверждения, которая представляет собой гиперболу. Эта зависимость, как правило, хорошо аппроксимируется прямой. В этом случае время потери текучести t_* может быть определено экстраполяцией временной зависимости нормированной вязкости $1/\eta$ на значение $1/\eta \rightarrow 0$. Конечно, при экстраполяции величины $1/\eta$ к нулевому значению может иметь место ошибка, которая тем меньше, чем больших предельных значений вязкости было достигнуто в эксперименте. В наших измерениях максимальное значение вязкости составляло не менее 8000 Па·с, что как минимум на порядок больше, чем в известных экспериментальных работах.

Результат обработки ряда данных в координатах $(1/\eta)(t)$ показан на рис. 2. Все зависимости хорошо аппроксимируются отрезком прямой с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.99$, а пересечение с осью абсцисс позволяет определить момент достижения бесконечной вязкости, т.е. гель-точки.

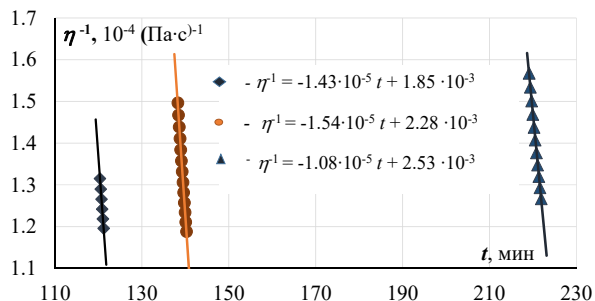


Рис. 2. Пример обработки данных в координатах $(1/\eta)(t)$. Слева-направо: $\alpha = 0.5; 0.3; 0.1$ °C/мин. Сплошные линии – аппроксимационные зависимости

4. Математическая модель. Сравнение с экспериментом

В работе авторов [16] предложена и экспериментально обоснована простейшая кинетическая модель, описывающая процесс полимеризации в случае стехиометрического равновесия.

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} = K(T(t))\varphi(t)^2, \quad \varphi(0) = 1, \quad (2)$$

$$\varphi(t) = \frac{1}{1 + \int_0^t K(T(\tau))d\tau}. \quad (3)$$

Данная модель представляет из себя задачу Коши, имеющую аналитическое решение. Здесь $\varphi(t)$ – доля непрореагировавших молекул смолы (или отвердителя), параметр $K(T(t))$ отражает скорость реакции полимеризации. Для оценки функции $K(T)$ была проведена серия экспериментов в изотермической постановке задачи при $T=25, 30, 35, 40, 45, 50$ °C. Откуда, с помощью вышеописанной методики определены значения $t_*(T)$.

Ранее авторами было показано, что для данной эпоксидной композиции доля непрореагировавших молекул, соответствующая времени отверждения $\varphi_* = \varphi(t_*) \approx 0.5$ [17].

Тогда в изотермическом случае получаем функцию вида

$$K(T) = \frac{\varphi_*^{-1} - 1}{t_*(T)}. \quad (4)$$

Аппроксимация экспериментальной зависимости (4) по закону Аррениуса имеет вид:

$$K(T) = 51590 \cdot \exp\left(-\frac{5020}{T + 273.15}\right). \quad (5)$$

Кроме того, можно воспользоваться полиномиальным приближением:

$$K(T) = a_0 + a_1(T - 25) + a_2(T - 25)^2, \quad (6)$$

$$a_0 = 1.626 \cdot 10^{-3}, \quad a_1 = 9.126 \cdot 10^{-6}, \quad a_2 = 7.248 \cdot 10^{-6}.$$

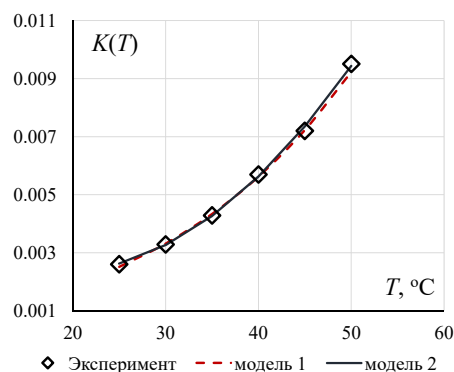


Рис. 3. Зависимость параметра скорости реакции полимеризации от температуры. Теория и эксперимент

Выражения (5) и (6) будем называть аппроксимационными моделями 1 и 2 соответственно. Сравнение результатов приближений с экспериментальными данными показано на рис. 3.

Как видно из рис. 3, модели 1 и 2 хорошо аппроксимируют экспериментальные данные, при этом максимальная погрешность модели 1 состав-

ляет приблизительно 4%, а для модели 2 – 2%. Исходя из этих результатов, а также учитывая возможность получения более простых аналитических решений, в дальнейшем будем использовать именно полиномиальную модель (6). Тогда решение задачи (2) для неизотермического варианта (1) при $T_0=25$ имеет вид:

$$\phi(t) = \begin{cases} \frac{1}{1 + K(T_0)t}, & 0 \leq t \leq t_0, \\ \frac{1}{\phi(t_0)^{-1} + (a_2(\alpha\tau)^2 / 3 + a_1(\alpha\tau) / 2 + a_0)\tau}, & \tau = t - t_0, \quad t_0 < t \leq t_1, \\ \frac{1}{\phi(t_1)^{-1} + K(T_1)(t - t_1)}, & t > t_1. \end{cases} \quad (7)$$

Из соотношений (7) нетрудно получить модельную оценку времени окончания процесса, как решение уравнения $\phi(t_*) = 0.5$. Результаты такого решения для варианта $t_0=0$ представлены на рис.4. Откуда видно, что модельный расчет и в случае неизотермической полимеризации дает хорошее согласие с экспериментом.

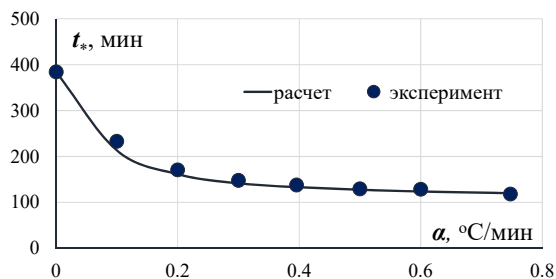


Рис. 4. Зависимость времени отверждения от скорости изменения температуры

Дополнительные эксперименты были проведены для случая $t_0=62.5$ с $\alpha=0.3$ и $\alpha=0.4$. При таких параметрах отклонение экспериментального времени отверждения от расчетного составило не более 7%.

5. Заключение

Проведена серия реологических экспериментов для исследования процесса полимеризации эпоксидной композиции при изменении температуры по кусочно-линейному закону. Полученные результаты позволили оценить время отверждения (перехода в гель-фазу). Использование простейшей кинетической модели процесса полимеризации, идентификация параметров которой проведена в изотермической постановке, позволило получить оценки времени отверждения, удовлетворительно согласующиеся с экспериментальными данными. Ожидается, что предлагаемая методика позволит оценить

время отверждения и для других законов изменения температуры и состава олигомеров.

Список литературы

1. Tonogai S., Sakaguchi Y., Seto S. Curing behavior of two-step phenolics by solvent extraction // J. Appl. Polym. Sci. 1978. Vol. 22. P. 3225–3234.
2. Durner J., Obermaier J., Draenert M., Ilie N. Correlation of the degree of conversion with the amount of elutable substances in nano-hybrid dental composites // Dental materials. 2012. Vol. 28. P. 1146–1153.
3. Moraes L., Rocha R., Menegazzo L., de Araújo E., Yukimitu K., Moraes J. Infrared spectroscopy: a tool for determination of the degree of conversion in dental composites // J. Appl. Oral. Sci. 2008. Vol. 16. N 2. P. 145–149.
4. Barton J., Buist G., Hamerton I., Howlin B., Jones J., Liu S. High temperature 1H NMR studies of epoxy cure: a neglected technique // Polym. Bull. 1994. Vol. 33. P. 215–219
5. Pianelli C., Devaux J., Bebelman S., Leloup G. The micro-Raman spectroscopy, a useful tool to determine the degree of conversion of light-activated composite resins // J. Biomed. Mater. Res. (Appl. Biomat.) 1999. Vol. 48. P. 675–681.
6. Pandita S., Wang L., Mahendran R., Machavaram V., Irfan M., Harris D., Fernando G. Simultaneous DSC-FTIR spectroscopy: Comparison of cross-linking kinetics of an epoxy_amine resin system // Thermochim. Acta. 2012. Vol. 543. P. 9–17.
7. Онучин Д. В., Сопотов П. И., Кербер Ю. А. и др. Изучение процесса отверждения эпоксидной клеевой композиции холодного отверждения, модифицированной сложными эфирами // Пластические массы. 2012. № 8. С. 6–9.
8. Осипчик В. С., Горбунова И. Ю., Костромина Н. В., Олихова Ю. В., Буй Д. М. Исследование процессов отверждения эпоксидных олигомеров //

- Химия и химическая технология. 2014. Т. 57. Вып. 3. С. 19–22.
9. Косарев А. В., Студенцов В. Н. Структурная модель изменения вязкости в процессе отверждения олигомерной смолы ЭД-20 // Пластические массы. 2019. № 1–2. С. 3–5.
 10. Студенцов В. Н. Кинетика отверждения термоактивных смол и изменение их вязкости в процессе отверждения // Пластические массы. 2019. № 1–2. С. 24–26.
 11. Свистков А. Л., Елисеева А. Ю., Кондюрин А. В. Математическая модель реакции отверждения ЭД-20 с отвердителем ТЭАТ-1 // Вестник Пермского университета. Физика. 2019. № 1. С. 9–16.
 12. Kondyurin A., Komar L. A., Svistkov A. L. Combinatory model of curing process in epoxy composite // *J. Composites, Part B: Engineering*. 2012. Vol. 43. P. 616–620.
 13. Кондюрин А. В., Комар Л. А., Свистков А. Л. Моделирование отверждения композиционного материала в условиях открытого космоса // Механика композиционных материалов и конструкций. 2009. Т. 15. № 4. С. 512–25.
 14. Малкин А. Я., Куличихин С. Г. Реология в процессах образования и превращения полимеров. М.: Химия, 1985. 240 с.
 15. Malkin A. Ja., Kulichikhin S. G. Rheokinetics of curing // *Adv. Polym. Sci.*. 1991. Vol. 101. P. 217–257.
 16. Гилев В. Г., Русаков С. В., Чудинов В. С., Рахманов А. Ю., Кондюрин А. В. Моделирование кинетики отверждения эпоксидного связующего композитного материала аэрокосмического назначения при нарушении стехиометрии // Механика композитных материалов. 2021. Т. 57. № 3. С. 517–534.
 17. Gilev V. G., Chudinov V. S., Rusakov S. V., Kondyurin A. V. Investigation of the isothermal rheokinetic polymerization of the epoxy oligomer // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. 2019. Vol. 7, N.3. P. 209–215.
 18. epoxy cure: a neglected technique. *Polym. Bull*, 1994, Vol. 33, pp. 215–219.
 19. Pianelli C., Devaux J., Bebelman S., Leloup G. The micro-Raman spectroscopy, a useful tool to determine the degree of conversion of light-activated composite resins. *J. Biomed. Mater. Res. (Appl. Biomater.)*, 1999, vol. 48. pp. 675–681.
 20. Pandita S., Wang L., Mahendran R., Machavaram V., Irfan M., Harris D., Fernando G. Simultaneous DSC-FTIR spectroscopy: Comparison of cross-linking kinetics of an epoxy_amine resin system. *Thermochim. Acta*, 2012, vol. 543, pp. 9–17.
 21. Onuchin D. V., Sopotov R. I., Kerber Yu. A. i dr. Izuchenie processa otverzheniya epoksidnoj kleevoj kompozicii holodnogo otverzheniya, modifitsirovannoj slozhnymi efirami. *Plasticheskie massy*. 2012. no 8. pp. 6–9. (In Russian).
 22. Osipchik V. S., Gorbunova I. YU., Kostromina N. V., Olihova YU. V., Buj D. M. Issledovanie processov otverzheniya epoksidnyh oligomero. *Himiya i himicheskaya tekhnologiya*. 2014. vol. 57, no. 3. pp. 19–22. (In Russian).
 23. Kosarev A. V., Studentsov V. N. Strukturnaya model' izmeneniya vyazkosti v processe otverzheniya oligomernoj smoly ED-20. *Plasticheskie massy*. 2019. no. 1–2. S. 3–5. (In Russian).
 24. Studentsov V. N. Kinetika otverzheniya termoreaktivnyh smol i izmenenie ih vyazkosti v processe otverzheniya. *Plasticheskie massy*. 2019. no. 1–2. pp. 24–26. (In Russian).
 25. Svistkov A. L., Eliseeva A. Yu., Kondyurin A. V. Matematicheskaya model' reakcii otverzheniya ED-20 s otverditelem TEAT-1. *Vestnik Permskogo universiteta. Fizika*. 2019. no 1. pp. 9–16. (In Russian).
 26. Kondyurin A., Komar L. A., Svistkov A. L. Combinatory model of curing process in epoxy composite. *J. Composites, Part B: Engineering*, 2012, vol. 43, pp. 616–620.
 27. Kondyurin A. V., Komar L. A., Svistkov A. L. Modelirovanie otverzheniya kompozitsionnogo materiala v usloviyah otkrytogo kosmosa. *Mekhanika kompozitsionnyh materialov i konstrukcij*. 2009. vol. 15, no 4. pp. 512–525. (In Russian).
 28. Malkin A. Ya., Kulichihin S. G. *Reologiya v processah obrazovaniya i prevrashcheniya polimerov*. M.: Himiya. 1985. 240 p. (In Russian).
 29. Malkin A. Ja., Kulichikhin S. G. Rheokinetics of curing. *Adv. Polym. Sci.*, 1991, vol. 101, pp. 217–257.
 30. Gilev V. G., Rusakov S. V., Chudinov V. S., Rakhmanov A. Yu., and Kondyurin A. V. Modeling the curing kinetics of an epoxy binder with disturbed stoichiometry for a composite material of aerospace purpose. *Mechanics of composite materials*, 2021, vol. 57, no. 3, pp. 517–534.
 31. Gilev V. G., Chudinov V. S., Rusakov S. V., Kondyurin A. V. Investigation of the isothermal rheokinetic polymerization of the epoxy oligomer. *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*, 2019, vol. 7, no.3, pp. 209–215.

References

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Русаков С. В., Гилев В. Г. К оценке времени отверждения эпоксидного олигомера в ходе процесса не-изотермической полимеризации // Вестник Пермского университета. Физика. 2021. № 3. С. 30–36. doi: 10.17072/1994-3598-2021-3-30-36 редакцией

Please cite this article in English as:

Rusakov S. V., Gilev V. G. To estimate the curing time of epoxy oligomer during nonisothermal polymerization process. Bulletin of Perm University. Physics, 2021, no. 3, pp. 30–36. doi: 10.17072/1994-3598-2021-3-30-36

Сведения об авторах

1. *Сергей Владимирович Русаков*, д-р. физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики и информатики, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614990.
2. *Валерий Григорьевич Гилев*, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики фазовых переходов, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614990.

Author information

1. *Sergeiy V. Rusakov*, Doctor of the Physical and Mathematical Sciences, Professor; Head of the Applied Mathematics and Informatics, Perm State University, Bukirev str. 15, 614990, Perm, Russia.
2. *Valeriy G. Gilev*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Docent; Associated Professor of the Department of Phase Transition Physics Perm State University, Bukirev str. 15, 614990, Perm, Russia.