

Моделирование кинетики отверждения эпоксидного связующего, модифицированного ускорителями, и экспериментальное определение степени конверсии в точке гелеобразования

© Любимова Анастасия Сергеевна

ООО «Композит изделия». пер. Б. Саввинский, д.12, стр.8. г. Москва, 119435. Россия.

Тел.: +7 (499) 281-66-37. E-mail: info@cp-vm.ru

*Ведущий направление; *Поддерживающий переписку

Ключевые слова: кинетика отверждения, эпоксидная смола, ускоритель, ДСК, модель Камала–Сурура, гелеобразование, степень конверсии.

Аннотация

Методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) исследована кинетика отверждения эпоксидного связующего на основе диановой смолы, аминного отвердителя и ускорителя – бензилового спирта и салициловой кислоты. Для изотермических условий (40 °C) определены параметры автокаталитической модели Камала–Сурура. Полученные результаты подтверждают доминирование автокаталитического механизма, обусловленного наличием доноров протонов (бензилового спирта и салициловой кислоты). В связи с техническими ограничениями ДСК при низких температурах (25 °C) – низким тепловым потоком и высоким уровнем шумов, не позволяющим провести корректное интегрирование в изотермическом режиме, – разработана альтернативная методика определения степени конверсии в точке гелеобразования. Методика включает изотермическую выдержку образца в термостате в течение времени, соответствующего моменту гелеобразования, с последующим динамическим ДСК-анализом остаточного теплового эффекта. Полученная степень превращения хорошо согласуется с реологическими данными, что подтверждает корректность предложенного подхода. Отмечено, что именно интервал до гелеобразования является критическим для технологии вакуумной инфузии, поскольку после достижения точки геля переработка связующего становится невозможной из-за диффузионных ограничений и снижения подвижности полимерной сетки. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования времени жизнеспособности связующего, оптимизации технологических режимов и снижения брака при производстве крупногабаритных полимерных композиционных изделий на основе реактопластичных связующих.

Выходные данные для цитирования русскоязычной печатной версии статьи:

Любимова А.С. Моделирование кинетики отверждения эпоксидного связующего, модифицированного ускорителями, и экспериментальное определение степени конверсии в точке гелеобразования.

Бутлеровские сообщения. 2026. Т.87. №9. С.16-23. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-87-9-16

Выходные данные для цитирования русскоязычной электронной версии статьи:

Любимова А.С. Моделирование кинетики отверждения эпоксидного связующего, модифицированного ускорителями, и экспериментальное определение степени конверсии в точке гелеобразования.

Бутлеровские сообщения А. 2026. Т.14. №3. Id.18. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-87-9-16/ROI-jbc-A/26-14-3-18 (Russian)

The output for citing the English online version of the article:

Anastasia S. Lyubimova. Modeling the curing kinetics of an epoxy binder modified with accelerators and experimental determination of the degree of conversion at the gel point. *Butlerov Communications A.* 2026. Vol.14. No.3. Id.18. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-87-9-16/ROI-jbc-A/26-14-3-18

Литература

- [1] Le Craz S., Pethrick R.A. Solvent effects on cure 1-benzyl alcohol on epoxy cure. *International Journal of Polymeric Materials.* 2011. Vol.60. No.7. P.441-455. DOI:10.1080/00914037.2010.531813
- [2] Kamal M.R., Sourour S. Kinetics and thermal characterization of thermoset cure. *Polymer Engineering & Science.* 1973. Vol.13. No.1. P.59-64. DOI: 10.1002/pen.760130110

- [3] Gonzalez-Romero V.M., Macosko C.W. Viscosity Rise During Free Radical Crosslinking Polymerization with Inhibition. *Journal of Rheology*. **1985**. Vol.29. No.3. P.259-272. DOI: 10.1122/1.549812
- [4] Куличихин С.Г., Реутов А.С., Сурова М.С., Осипова Е.В., Малкин А.Я. Исследование начальных стадий отверждения ДИФА вискозиметрическим методом. *Пластмассы*. **1988**. №5. С.43-44. [S.G. Kulichikhin, A.S. Reutov, M.S. Surova, E.V. Osipova, A.Ya. Malkin. Investigation of the initial stages of DIFA curing by viscometric method. *Plastmassy*. **1988**. No.5. P.43-44. (Russian)]
- [5] Lee D.S., Han C.D. Effect of the Chemical Structure of Low-Profile Additives on the Curing Behavior and Chemorheology of Unsaturated Polyester Resin. *Polymer Engineering & Science*. **1987**. Vol.27. No.13. P.964-975. DOI: 10.1002/pen.760271405
- [6] Tziamtzi C.K., Chrissafis K. Optimization of a commercial epoxy curing cycle via DSC data kinetics modelling and TTT plot construction. *Polymer*. **2021**. Vol.230. P.124091. DOI: 10.1016/j.polymer.2021.124091
- [7] Dümichen E., Fallscheer K., Mäder E., et al. Analyzing the network formation and curing kinetics of epoxy resins by in situ near-infrared measurements with variable heating rates. *Thermochimica Acta*. **2015**. Vol.616. P.49-60. DOI: 10.1016/j.tca.2015.08.006
- [8] Обверткин И.В., Пасечник К.А., Воронина С.Ю. Моделирование кинетики отверждения эпоксидной матрицы волокнистого композиционного материала методами многокритериальной оптимизации. *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. **2022**. №6(402). С.221-227. DOI 10.47367/0021-3497_2022_6_221 [I.V. Obvertkin, K.A. Pasechnik, S.Yu. Voronina. Modeling the curing kinetics of an epoxy matrix of a fibrous composite material by multicriteria optimization methods. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. **2022**. No.6(402). P.221-227. (Russian)]
- [9] Anastasia S. Lyubimova. Modeling the curing kinetics of an epoxy binder modified with accelerators and experimental determination of the degree of conversion at the gel point. *Butlerov Communications A*. **2026**. Vol.14. No.3. Id.18. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-87-9-16/ROI-jbc-A/26-14-3-18
- [10] Любимова А.С. Моделирование кинетики отверждения эпоксидного связующего, модифицированного ускорителями, и экспериментальное определение степени конверсии в точке гелеобразования. *Бутлеровские сообщения А*. **2026**. Т.14. №3. Id.18. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-87-9-16/ROI-jbc-A/26-14-3-18 (Russian)

The English version of the article has been published in the international edition of the journal

Butlerov Communications A
Advances in Organic Chemistry & Technologies

The Reference Object Identifier – ROI-jbc-A/26-14-3-18

The Digital Object Identifier – DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-87-9-16/ROI-jbc-A/26-14-3-18

**Modeling the curing kinetics of an epoxy binder modified
with accelerators and experimental determination
of the degree of conversion at the gel point**

Anastasia S. Lyubimova

LLC "Kompozit Izdeliya". B. Savvinsky Lane, 12, Bldg. 8. Moscow. Russia.

Phone: +7 (499) 281-66-37. E-mail: info@cp-vm.ru

**Supervising author; *Corresponding author*

Keywords: curing kinetics, epoxy resin, accelerator, DSC, Kamal–Sourour model, gelation, degree of conversion.

Abstract

The curing kinetics of an epoxy binder based on a DGEBA-type epoxy resin, an amine hardener, and accelerators – benzyl alcohol and salicylic acid – were investigated by differential scanning calorimetry (DSC). Under isothermal conditions (40 °C), the parameters of the Kamal–Sourour autocatalytic model were determined. The obtained results confirm the dominance of the autocatalytic mechanism, attributed to the presence of proton donors (benzyl alcohol and salicylic acid). Due to instrumental limitations of DSC at low temperatures (25 °C) – low heat flow and high noise level, which prevent correct integration in isothermal mode – an alternative technique for determining the degree of conversion at the gel point has been developed. The technique involves isothermal holding of the sample in a thermostat for a time corresponding to the gel point, followed by dynamic DSC analysis of the residual heat effect. The obtained degree of conversion is consistent with the gel-point time determined rheologically, confirming the validity of the proposed approach. It is noted that the interval before gelation is critical for vacuum infusion technology, since after reaching the gel point, processing of the binder becomes impossible due to diffusion constraints and reduced mobility of the polymer network. The obtained results can be used to predict the pot life of the binder, optimize processing conditions, and reduce defects in the production of large-size polymer composite products based on thermoset binders.