

Синтез и переработка полимеров и композитов на их основе Synthesis and processing of polymers and polymeric composites

УДК 538.951-405

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2026-21-3-345-354>

EDN VTROKZ



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Реокинетика многокомпонентного эпоксидного связующего, модифицированного полисульфоном

В.П. Мешалкин¹, Н.И. Лукашов¹, А.А. Гарт¹, И.С. Потужный¹, С.В. Полунин^{1,✉},
И.Ю. Горбунова¹, Я.О. Межуев¹, Е.А. Беляева²

¹ Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, 125047 Россия

² АО “НПО Стеклопластик им. Н.Н. Трофимова”, ПГТ Андреевка, Солнечногорский район, Московская область, 141551 Россия

✉ Автор для переписки, e-mail: polunin.s.v@muctr.ru

Аннотация

Цели. Разработать эпоксидные многокомпонентные связующие для полимерных композиционных материалов, используя взаимосвязь реологических свойств с кинетикой химической реакции отверждения эпоксидной матрицы в присутствии термопластичного модификатора. Изменение реологических свойств связующих определяется конкуренцией двух процессов: реакции отверждения модифицированных эпоксидных олигомеров аминным отвердителем и процессом разделения фаз, что обусловлено потерей совместимости реакционноспособных компонентов системы с модификатором.

Методы. Использовали ротационную и осцилляционную реометрию в процессе отверждения. Исследованы кинетические закономерности процесса отверждения эпоксиаминных связующих на основе смеси трифункциональной и двифункциональной эпоксидных смол, модифицированных полисульфоном.

Результаты. Экспериментально изучена зависимость вязкости от времени отверждения эпоксидного связующего при различных температурах и концентрациях полисульфона; определены времена гелеобразования и стеклования, константы нарастания вязкости и энергия активации. Показано, что в процессе отверждения происходит фазовый распад, в результате чего образуется фаза, обогащенная полисульфоном, причем время разделения фаз сокращается при повышении концентрации модификатора.

Выводы. Установлено, что введение полисульфона в состав многокомпонентного эпоксиаминного связующего приводит к повышению времени гелеобразования на 8–15 мин в зависимости от температуры отверждения и количества термопласта, что объясняется повышением вязкости связующего.

Ключевые слова

реокинетика, трифункциональная эпоксидная смола, термопластичный модификатор, эпоксиаминные связующие, разделение фаз

Поступила: 04.02.2026

Доработана: 27.02.2026

Принята в печать: 17.04.2026

Для цитирования

Мешалкин В.П., Лукашов Н.И., Гарт А.А., Потужный И.С., Полунин С.В., Горбунова И.Ю., Межуев Я.О., Беляева Е.А. Реокинетика многокомпонентного эпоксидного связующего, модифицированного полисульфоном. *Тонкие химические технологии*. 2026;21(3): 345–354. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2026-21-3-345-354>

RESEARCH ARTICLE

Rheokinetics of a multicomponent epoxy binder modified with polysulfone

Valery P. Meshalkin¹, Nikolay I. Lukashov¹, Anna A. Gart¹, Ilya S. Potuzhnii¹,
Stepan V. Polunin¹✉, Irina Yu. Gorbunova¹, Yaroslav O. Mezhuiev¹, Elena A. Belyaeva²

¹ Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, 125047 Russia

² NPO Stekloplastic, Andreevka, Solnechnogorsk, Moscow oblast, 141551 Russia

✉ Corresponding author, e-mail: polunin.s.v@muctr.ru

Abstract

Objectives. The work set out to develop epoxy multicomponent binders for polymer composite materials by interrelating the rheological properties and the curing kinetics of the epoxy modified with thermoplastic. Changes in the rheological properties of binders are determined by the competition between two processes: the curing reaction of modified epoxy oligomers with an amine curing agent, and phase separation, which leads to a loss of compatibility between thermosetting components and modifier.

Methods. During the curing process, rotational and oscillational rheometry were used. The kinetic patterns of the curing process of epoxy-amine binders based on a mixture of trifunctional and bifunctional epoxy resins modified with polysulfone were studied.

Results. The dependence of viscosity on curing time of an epoxy binder at various temperatures and polysulfone content was experimentally studied. Gelation and vitrification time, viscosity growth constants, and activation energies values were determined. It was shown that phase separation induced by curing results in the formation of a polysulfone-rich phase. Moreover, the phase separation time decreases with higher modifier content.

Conclusions. It has been established that the adding of polysulfone into the composition of a multicomponent epoxy-amine binder leads to an enhancement in the gelation time by 8–15 min, depending on the curing temperature and the thermoplastic content, which is explained by an increase in the viscosity of the binder.

Keywords

rheokinetics, trifunctional epoxy resin, thermoplastic modifier, epoxy-amine binders, phase separation

Submitted: 04.02.2026

Revised: 27.02.2026

Accepted: 17.04.2026

For citation

Meshalkin V.P., Lukashov N.I., Gart A.A., Potuzhnii I.S., Polunin S.V., Gorbunova I.Yu., Mezhuiev Ya.O., Belyaeva E.A. Rheokinetics of a multicomponent epoxy binder modified with polysulfone. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2026;21(3):345–354. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2026-21-3-345-354>

ВВЕДЕНИЕ

Композиционные материалы на основе реакционноспособных олигомеров обладают большой популярностью во многих отраслях промышленности. Наибольшее распространение получили композиты на основе эпоксидных матриц, которые отличаются высокими технологическими и эксплуатационными характеристиками [1, 2] и находят применение в различных сферах в качестве связующих для композиционных материалов и клеев [3–5].

Материалы, содержащие в своем составе распространенные марки двифункциональных эпоксидных смол и ароматические амины в качестве отвердителей, характеризуются температурным пределом эксплуатации до 150–180°C [6–9]. Однако в ряде случаев этого недостаточно. Расширить температурный

диапазон эксплуатации возможно, используя в качестве основы связующих эпоксидные смолы с тремя и более эпоксидными группами [10–12]. При отверждении таких смол образуется более плотная сетка химических связей, что способствует формированию реактопластов с более высокой теплостойкостью.

Полимеры на основе трифункциональной эпоксидной смолы, например, марки Tactix-742 (*Huntsman Advanced Materials*, Базель, Швейцария), обладают высокой температурой стеклования (335°C [13]), но в то же время характеризуются меньшими значениями трещиностойкости и ударной вязкости по сравнению с полимерами на основе диановых смол [14–16]. Регулирование свойств эпоксидных полимеров позволяет нивелировать недостатки определенной композиции и создавать материалы, соответствующие запросам современной промышленности.

Это можно реализовать с помощью модифицирования эпоксидных композиций реакционноспособными и инертными соединениями различных классов, что открывает широкие возможности для разработки новых материалов. Трещиностойкость и ударную вязкость можно повысить путем модифицирования связующих конструкционными термопластами, такими как полисульфон, полиэфирсульфон, полиарилэфиркетон и др. [17–21]. При отверждении этих связующих из-за ограниченной совместимости термопластичных модификаторов с эпоксидной смолой происходит разделение фаз, что приводит к образованию гетерогенной структуры. При этом меняется механизм разрушения за счет ветвления трещины на границе фаз, что увеличивает трещиностойкость полимера.

Часто введение термопластов приводит к повышению вязкости эпоксидных композиций, что особенно критично при получении материалов на основе трифункциональных смол [22, 23]. Добиться снижения вязкости можно, используя двуфункциональные эпоксидные смолы [24–26], которые участвуют в процессе образования трехмерной сетки, в отличие от монофункциональных активных разбавителей. Это позволяет избежать значительного снижения температуры стеклования [27–31].

Таким образом, введение термопластичного модификатора способствует повышению прочностных свойств эпоксидных полимеров, а введение диановой смолы снижает вязкость связующих, содержащих трифункциональные смолы. Целью настоящей работы является одновременное использование данных подходов для получения новых эпоксидных

многокомпонентных связующих для полимерных композиционных материалов с повышенной теплоустойчивостью.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Связующие получали на основе смеси трифункциональной эпоксидной смолы марки Tactix-742 (*Huntsman Advanced Materials*, Базель, Швейцария; $M_w = 556$ г/моль) и двуфункциональной эпоксидной смолы (*Shandong Deyuan Epoxy Resin Co.*, Фэйчэн, провинция Шаньдун, Китай, $M_w = 430$ г/моль), взятых в соотношении 1 : 1. В качестве термопластичного модификатора был выбран полисульфон марки ПСК-1 (*АО «Институт пластмасс»*, Москва, Россия, $M_n = 15.3$ кДа). В качестве отвердителя использовали 4,4'-диаминодифенилсульфон (*Basf*, Людвигсхафен, Германия). Структурные формулы материалов представлены на рис. 1.

Перед приготовлением композиций термопластичный модификатор и отвердитель 4,4'-диаминодифенилсульфон (ДДС; 4,4'-diaminodiphenylsulfone, DDS) сушили в термощкафу при 130°C в течение 4 ч. Исследуемые композиции получали при помощи верхнеприводного аппарата смешения. Смесь трифункциональной эпоксидной смолы (ТЭС; trifunctional epoxy resin, TER) и двуфункциональной эпоксидной смолы (ДЭС; difunctional epoxy resin, DER) в соотношении 1 : 1 разогревали до 150°C, устанавливали скорость вращения привода мешалки на 250 об/мин и порционно добавляли полисульфон (ПСФ; polysulfone, PSF) до полного растворения. Далее полученную смесь охлаждали до 125°C и вводили отвердитель, продолжая

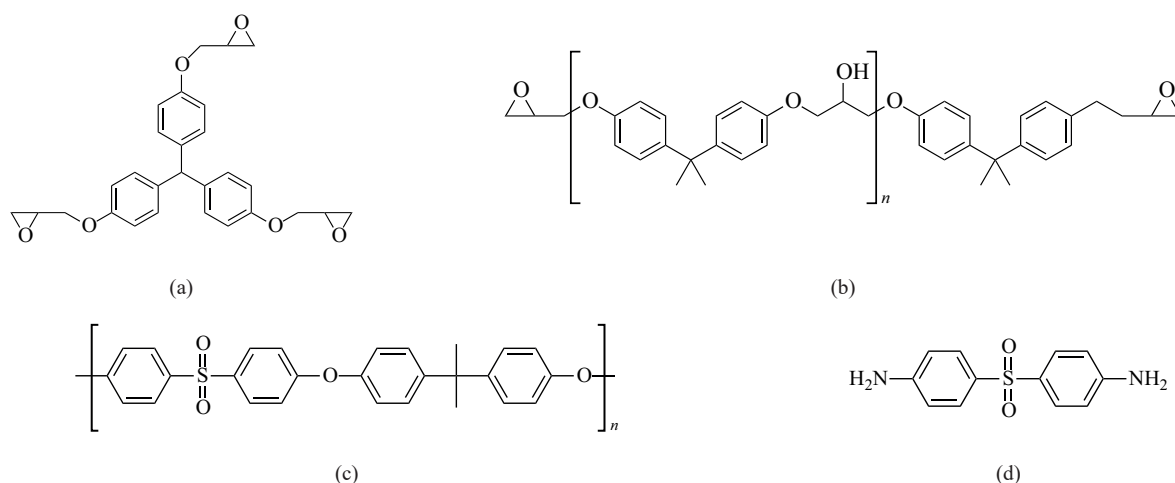


Рис. 1. Структурные формулы:

(а) трифункциональная эпоксидная смола, (б) двуфункциональная эпоксидная смола, (с) полисульфон, (д) 4,4'-диаминодифенилсульфон

Fig. 1. Structural formulas:

(a) trifunctional epoxy resin, (b) bifunctional epoxy resin, (c) polysulfone, and (d) 4,4'-diaminodiphenylsulfone

перемешивание так же до полного растворения. В табл. 1 представлены соотношения компонентов в каждой из композиций в массовых частях (м.ч.).

Таблица 1. Соотношение компонентов в исследованных композициях (м.ч.)

Table 1. Ratio of components in the studied compositions (parts by weight, pbw)

№	ТЭС+ДЭС TER+DER	ПСФ PSF	ДДС DDS
1	100	0	34
2	100	10	34
3	100	23	34
4	100	30	34

Процесс отверждения исследовали при помощи ротационного реометра Kinexus Ultra+ (Netzsch, Зельб, Германия) с использованием измерительной системы плоскость-плоскость. Зазор между измерительными плоскостями составлял 1 мм. Измерения проводили при температурах 160, 170 и 180°C в режиме постоянного сдвига при скорости сдвига 0.1 c^{-1} и в режиме периодического сдвига при частоте 1 Гц и амплитуде, взятой из области линейной вязкоупругости.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 показаны зависимости логарифма сдвиговой вязкости (η) от времени отверждения (t). Видно, что введение термопластичного модификатора приводит к росту начальной вязкости связующих на 0.5–10 Па в зависимости от содержания полисульфона и температуры отверждения (T). Это приводит к тому, что зависимости вязкости от времени отверждения смещаются вправо по оси времени и, таким образом, эпоксидные композиции, содержащие полисульфон, характеризуются увеличенным временем гелеобразования.

В определенный момент в процессе отверждения в модифицированных связующих наблюдается некоторое замедление роста вязкости, отмеченное на рис. 2 символом «f». Это связано с разделением фаз в процессе отверждения вследствие повышения молекулярной массы реакционноспособной смеси эпоксидных смол. Таким образом, из отверждающейся системы выделяется наиболее вязкий компонент — фаза, обогащенная термопластичным модификатором. Далее вязкость снова нарастает вследствие продолжающегося процесса отверждения. В табл. 2 приведены значения времени, соответствующие моменту разделения фаз (t_f) в процессе отверждения для систем с различным содержанием (C) полисульфона.

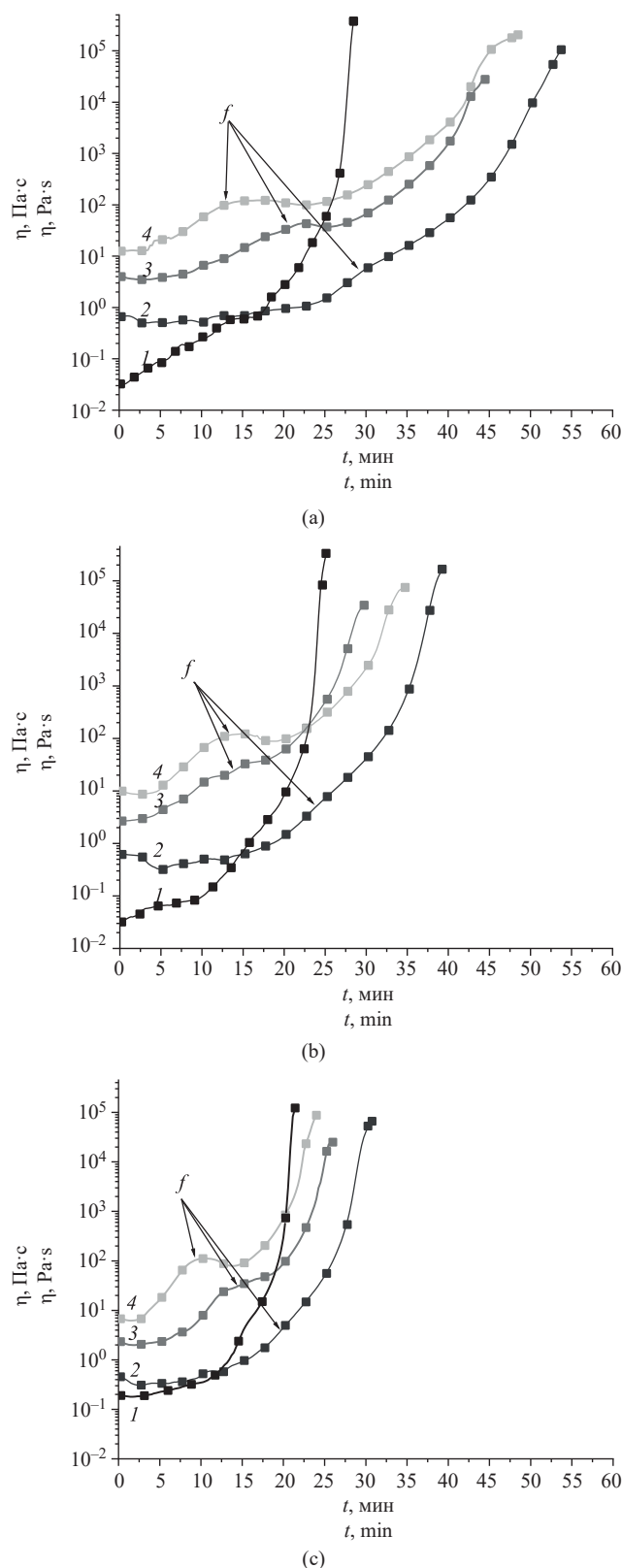


Рис. 2. Зависимость вязкости от времени отверждения при температурах, °C:

(a) 160, (b) 170, (c) 180, для связующих с различным содержанием полисульфона, м.ч.:

(1) 0, (2) 10, (3) 23, (4) 30. f — момент фазового распада

Fig. 2. Viscosity vs curing time at temperatures, °C: (a) 160, (b) 170, (c) 180, for binders with different polysulfone content, pbw: (1) 0, (2) 10, (3) 23, (4) 30. f is a moment of phase separation

Таблица 2. Время фазового распада t_{ϕ} **Table 2.** Time of phase separation $t_{\text{ph.s}}$

C, м.ч. C, pbw	t_{ϕ} , мин $t_{\text{ph.s}}$, min		
	160°C	170°C	180°C
10	28	25	19
23	24	15	12
30	10	9	7

По данным табл. 2 видно, что повышение температуры отверждения приводит к более раннему фазовому распаду так же, как и повышение концентрации модификатора. Известно, что система полисульфон–эпоксидная смола характеризуется верхней критической температурой раствора [32, 33]. Таким образом, при более высокой температуре отверждения исходная система оказывается ближе к точке фазового распада [34, 35]. Этот факт является также причиной сокращения времени разделения фаз в процессе отверждения при повышении содержания полисульфона. По данным рис. 2 рассчитали значение константы нарастания вязкости (табл. 3), энергию активации процесса отверждения на стадии гелеобразования (табл. 4), а также время гелеобразования (табл. 5).

Таблица 3. Константы нарастания вязкости**Table 3.** Viscosity growth constants

C, м.ч. C, pbw	k_{η} , мин ⁻¹ k_{η} , min ⁻¹			k'_{η} , мин ⁻¹ k'_{η} , min ⁻¹		
	160°C	170°C	180°C	160°C	170°C	180°C
0	0.664	1.118	1.655	—	—	—
10	0.277	0.346	0.451	0.708	1.251	2.250
23	0.263	0.342	0.487	0.511	0.795	1.531
30	0.256	0.339	0.507	0.186	0.278	0.517

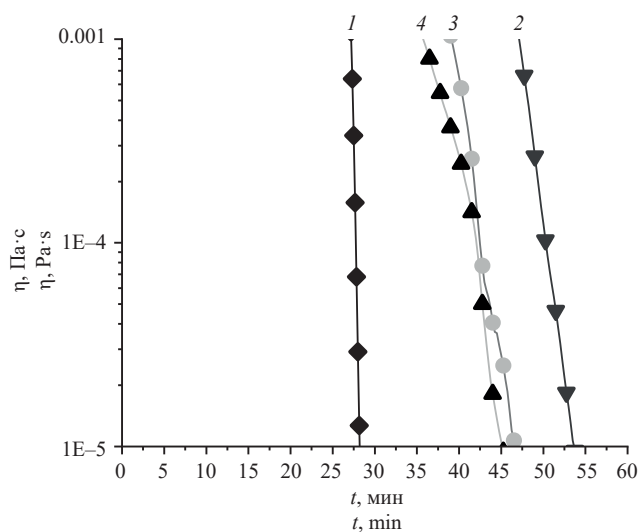
Таблица 4. Энергии активации реакции отверждения**Table 4.** Activation energies of the curing reaction

C, м.ч. C, pbw	E_a , кДж/моль E_a , kJ/mol
0	75 ± 5
10	94 ± 2
23	89 ± 6
30	83 ± 3

Таблица 5. Времена точки кроссовера t^* , гелеобразования $t_{\text{гель}}$ и стеклования t_v эпоксидных систем**Table 5.** Crossover point t^* , gelation time t_{gel} , and vitrification time t_v of epoxy systems

C, м.ч. C, pbw	$t^* / t_{\text{гель}}$, мин t^* / t_{gel} , min			t_v , мин t_v , min		
	160°C	170°C	180°C	160°C	170°C	180°C
0	35 / 28	22 / 17	16 / 12	78	58	46
10	49 / 50	36 / 37	25 / 29	89	71	54
23	50 / 47	36 / 36	26 / 26	87	70	52
30	47 / 44	32 / 33	24 / 24	82	64	48

В процессе отверждения вязкость в момент гелеобразования стремится к бесконечности, соответственно обратная вязкость ($1/\eta$) стремится к нулю. На конечных этапах отверждения зависимость обратной вязкости от времени хорошо аппроксимируется прямой, пересечение которой с осью абсцисс позволяет определить время гелеобразования (рис. 3). Время гелеобразования ($t_{\text{гель}}$) исследуемых связующих показано в табл. 5.

**Рис. 3.** Зависимость обратной вязкости от времени отверждения при $T = 160^\circ\text{C}$ для связующих с различным содержанием полисульфона, м.ч.:

(1) 0, (2) 10, (3) 23, (4) 30

Fig. 3. Reciprocal viscosity vs the curing time at $T = 160^\circ\text{C}$ for binders with different polysulfone contents, pbw:

(1) 0, (2) 10, (3) 23, (4) 30

Согласно данным табл. 5 при введении полисульфона время гелеобразования увеличивается примерно на 12–22 мин в зависимости от температуры отверждения по сравнению с немодифицированным эпоксидным связующим. Это связано с тем, что термопласт разбавляет реакционноспособную систему и приводит к повышению стерических затруднений,

что является причиной лимитирования реакции между эпоксидными группами и молекулами отвердителя. Это является причиной замедления процесса отверждения на ранней стадии. Таким образом, связующие, содержащие полисульфон, характеризуются повышенной жизнеспособностью по сравнению с системой без модификатора. Расширенное технологическое окно позволяет получать более крупногабаритные изделия, например, из армированных пластиков.

Для подтверждения, сделанного выше предположения, рассчитали константу нарастания вязкости до (k_η) и после (k'_η) разделения фаз (табл. 3). Связь вязкости от времени отверждения описывается уравнением (1), из которого следует, что угол наклона прямолинейного участка на графике η – t соответствует константе нарастания вязкости, которая характеризует скорость отверждения на начальной стадии процесса.

$$\eta = \eta_0 \cdot \exp(k_\eta \cdot t), \quad (1)$$

где η — вязкость (Па·с), η_0 — вязкость в начальный момент времени (Па·с), k_η — константа нарастания вязкости (мин^{-1}), t — время отверждения (мин).

По данным табл. 3 видно, что до момента фазового распада, когда процесс отверждения носит гомогенный характер, значения k_η в системах с полисульфоном оказываются меньше в 2.4–3.7 раза по сравнению со связующим без модификатора. После фазового распада, когда отверждение носит уже гетерогенный характер, значение константы нарастания вязкости в основном повышается по сравнению с начальным значением. Данное явление зафиксировано для всех модифицированных систем. Таким образом, после разделения фаз реакция отверждения протекает практически с той же скоростью, как и изначально в немодифицированной системе, поскольку значения k_η отличаются незначительно.

Построив зависимость константы нарастания вязкости от обратной температуры (рис. 4.), можно рассчитать энергию активации химической реакции отверждения по формуле (2):

$$k_\eta = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (2)$$

где k_η — константа нарастания вязкости (мин^{-1}), A — предэкспоненциальный множитель (мин^{-1}), E_a — энергия активации (Дж/моль), R — универсальная газовая постоянная (Дж/(моль·К)), T — температура (К).

Полученные таким образом значения энергий активации представлены в табл. 5.

Таким образом, при введении модификатора энергия активации реакции отверждения возрастает на 19 кДж/моль, при этом дальнейшее увеличение концентрации модификатора приводит к ее

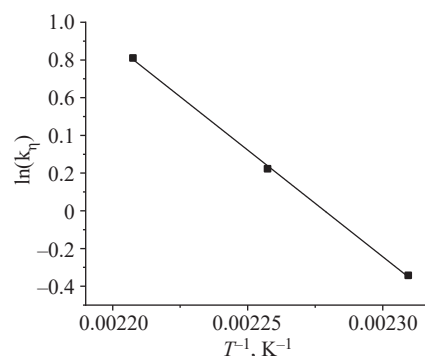


Рис. 4. Типичная зависимость натурального логарифма константы нарастания вязкости от обратной температуры

Fig. 4. Typical dependence of the natural logarithm of the viscosity growth constant on the reciprocal temperature

некоторому снижению. Повышение энергии активации объясняется возникновением стерических затруднений, создаваемых молекулами термопласта, и повышением вязкости связующих с ростом концентрации модификатора.

Кроме этого, введение в композицию термопластичного модификатора способствует повышению времени гелеобразования и, как следствие, жизнеспособности связующих за счет эффекта разбавления и увеличения начальной вязкости. Ожидалось, что увеличение концентрации модификатора будет приводить к росту времени гелеобразования и энергии активации, однако наблюдается незначительное снижение значений этих характеристик. Эффект разбавления реакционноспособной системы оказывает значительное влияние на скорость процесса отверждения только до момента разделения фаз. Поэтому дальнейшее введение модификатора в количестве 23 и 30 м.ч. сокращает время гелеобразования по сравнению с системой, содержащей 10 м.ч. полисульфона.

При помощи метода осцилляционной реометрии можно изучить процесс отверждения до более глубоких степеней отверждения. На начальном этапе процесса отверждения модуль потерь (G'') преобладает над модулем накопления (G'), поскольку исследуемая система находится в жидком состоянии. По значению G'' можно также оценить динамическую вязкость связующих, основываясь на уравнении (3). Таким образом, данные осцилляционной реометрии также дают представление о влиянии полисульфона на текучесть эпоксидных связующих.

$$\eta' = \frac{G''}{\omega}, \quad (3)$$

где η' — динамическая вязкость (Па·с), G'' — модуль потерь (Па), ω — частота (с^{-1}).

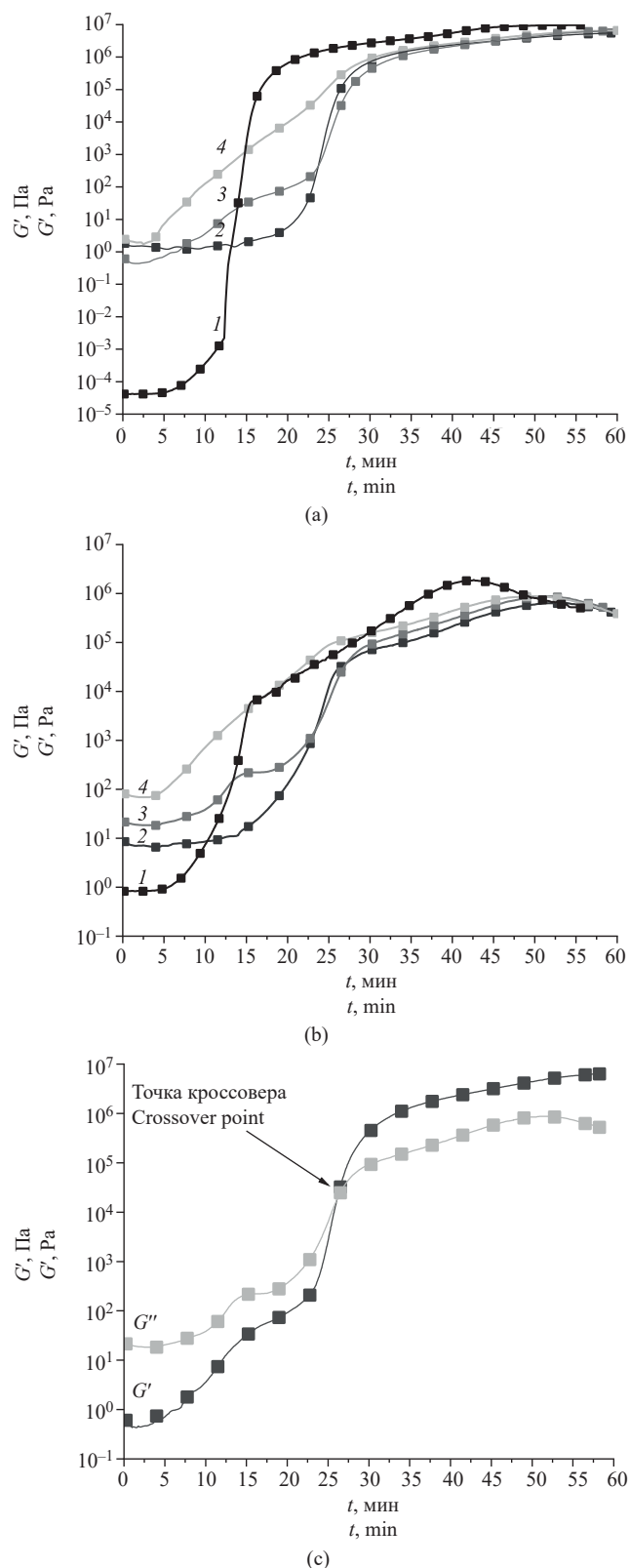


Рис. 5. Зависимость (а) модуля накопления и (б) модуля потерь от времени отверждения при 180°C для связующих с различным содержанием полисульфона, м.ч.: (1) 0, (2) 10, (3) 23, (4) 30; (с) определение точки кроссовера

Fig. 5. (a) Storage modulus and (b) loss modulus vs the curing time at 180°C for binders with different polysulfone contents, pbw: (1) 0, (2) 10, (3) 23, (4) 30, and (c) definition of crossover point

В процессе отверждения повышаются значения компонентов комплексного модуля упругости, и в определенный момент модуль накопления становится выше модуля потерь. В осцилляционной реометрии время гелеобразования ассоциируют с точкой кроссовера (t^*) — моментом времени, когда значения $G' = G''$. Отверждающаяся система выше точки кроссовера приобретает характеристики твердого тела и оказывается таким образом в высокоэластическом состоянии. Далее система переходит в стеклообразное состояние. При этом на зависимости G'' от t наблюдается максимум. Значения точек кроссовера и времени стеклования (t_v) представлены в табл. 5.

Повышение температуры отверждения, как и ожидалось, приводит к уменьшению времени достижения точки кроссовера (до 2.2 раз). При этом введение модификатора в количестве 10–30 м.ч. приводит к увеличению t^* по сравнению с немодифицированной системой. Следует отметить, что повышение концентрации модификатора приводит к более раннему фазовому распаду, что ведет к снижению времени достижения точки кроссовера и дальнейшему переходу в стеклообразное состояние. Таким образом, данные осцилляционной реометрии хорошо коррелируют с данными, полученными в режиме постоянно сдвига. Следовало бы ожидать, что чем выше содержание модификатора, тем выше будет жизнеспособность связующего, поскольку повышается начальная вязкость связующего и степень разбавления реакционноспособной системы. С понижением температуры отверждения более существенно повышается начальная вязкость модифицированных полисульфоном связующих, что может приводить к более выраженному эффекту замедления процесса гелеобразования в системе, содержащей 30 м.ч. модификатора. Однако при повышении содержания модификатора с 10 до 30 м.ч. время гелеобразования снижается примерно на 5 мин даже при 160°C. Такая же тенденция наблюдается и при повышенных температурах отверждения (170 и 180°C). Вероятно, ключевую роль играет не вязкостный фактор, а разбавление реакционноспособной системы термопластом, поскольку степень разбавления при равной концентрации полисульфона остается неизменной при любой изотерме отверждения. Видимо, стерические затруднения в процессе отверждения, создаваемые модификатором, наиболее существенно сказываются только до момента разделения фаз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом реометрии было исследовано влияние концентрации полисульфона на изменения времен точки кроссовера, стеклования и гелеобразования смесового эпоксидного связующего. Показано, что

введение 10 м.ч. полисульфона приводит к увеличению энергии активации реакции отверждения и жизнеспособности связующего. Дальнейшее увеличение концентрации модификатора приводит к снижению этих параметров ввиду сокращения времени фазового распада. Время гелеобразования увеличивается до 2.4 раз в системе с модификатором по сравнению с немодифицированным эпоксидным связующим. Более широкое технологическое окно разработанных связующих позволяет эффективно их применять при получении изделий на основе композиционных материалов, например, методом компрессионного прессования, для использования в авиационной и космической промышленности.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-69-00012).

Acknowledgments

The study was supported by the Russian Science Foundation, project No. 25-69-00012.

Вклад авторов

В.П. Мешалкин — постановка задачи и цели исследования, планирование эксперимента.

Н.И. Лукашов — формальный анализ полученных данных по реокинетике отверждения, написание черновика статьи.

А.А. Гарт — оформление рисунков статьи, анализ данных, участие в проведении экспериментов.

И.С. Потужный — проведение экспериментов на реометре.

С.В. Полунин — обсуждение полученных результатов, редактирование текста статьи.

И.Ю. Горбунова — планирование эксперимента, обсуждение полученных результатов, редактирование текста статьи.

Я.О. Межуев — обсуждение полученных результатов, редактирование текста статьи.

Е.А. Беляева — проведение экспериментов на реометре, первичная обработка данных.

Authors' contributions

V.P. Meshalkin — problem statement, research idea, planning the experiments.

N.I. Lukashov — formal analysis of the obtained data on the rheokinetics of curing, writing a draft of the manuscript.

A.A. Gart — design of the figures, data analysis, participation in conducting experiments.

I.S. Potuzhnyi — conducting experiments on a rheometer.

S.V. Polunin — discussing the results, editing the text of the manuscript.

I.Yu. Gorbunova — planning the experiments, discussing the results, editing the text of the manuscript.

Ya.O. Mezhev — discussing the results, editing the text of the manuscript.

E.A. Belyaeva — conducting experiments on a rheometer, primary data processing.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Perez R.M., Sandler J.K.W., Altstädt V., *et al.* Novel phosphorus-modified polysulfone as a combined flame retardant and toughness modifier for epoxy resins. *Polymer*. 2007;48(3): 778–790. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2006.12.011>
2. Woo E.M., Bravenec L.D., Seferis J.C. Morphology and properties of an epoxy alloy system containing thermoplastics and a reactive rubber. *Polym. Eng. Sci.* 1994;34(22): 1664–1673. <https://doi.org/10.1002/pen.760342204>
3. Yıldız E., Özarslan Ö., İnan T.Y., Kuyulu A., Güngör A. Toughening of Epoxy Resins by Amine Terminated Poly(arylene ether ketone)s having Pendant Tertiary Butyl Groups. *Polym. Bull.* 2007;58(3):503–511. <https://doi.org/10.1007/s00289-006-0689-x>
4. Zheng T., Xi H., Wang Z., *et al.* The curing kinetics and mechanical properties of epoxy resin composites reinforced by PEEK microparticles. *Polym. Testing*. 2020;91:106781. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106781>
5. Wu J., Li C., Hailatihan B., Mi L., Baheti Y., Yan Y. Effect of the Addition of Thermoplastic Resin and Composite on Mechanical and Thermal Properties of Epoxy Resin. *Polymers*. 2022;14(6):1087. <https://doi.org/10.3390/polym14061087>
6. Wu Z., Chen Q., Liu D., Fan J., Zhang Q., Chen W. *In situ* monitoring of epoxy resin curing process: Using glass transition as a bridge. *Polym. Testing*. 2023;117:107871. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107871>
7. Teng N., Dai J., Wang S., Hu J., Liu X. Hyperbranched flame retardant for epoxy resin modification: Simultaneously improved flame retardancy, toughness and strength as well as glass transition temperature. *Chem. Eng. J.* 2022;428:131226. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131226>
8. Yue C., Guan L., Zhang X., Wang Y., Weng L. Thermally conductive epoxy/boron nitride composites with high glass transition temperatures for thermal interface materials. *Mater. Des.* 2021;212:110190. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110190>
9. Franieck E., Fleischmann M., Hölk O., Kutuzova L., Kandelbauer A. Cure Kinetics Modeling of a High Glass Transition Temperature Epoxy Molding Compound (EMC) Based on Inline Dielectric Analysis. *Polymers*. 2021;13(11):1734. <https://doi.org/10.3390/polym13111734>
10. Liu X.F., Xiao Y.F., Luo X., *et al.* Flame-Retardant multifunctional epoxy resin with high performances. *Chem. Eng. J.* 2022;427:132031. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132031>
11. Wang H., Wang Y., Gao J., Zhu Z., Xiao F. Synergistic engineering of phosphaphenanthrene and ionic liquids for unlocking flame retardant multifunctional epoxy resin with high performances. *Polym. Degr. Stab.* 2025;239:111407. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2025.111407>
12. Dong M., Zhang H., Tzounis L., Santagiuliana G., Bilotti E., Papageorgiou D.G. Multifunctional epoxy nanocomposites reinforced by two-dimensional materials: A review. *Carbon*. 2021;185:57–81. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.09.009>

13. Dyer W.E., Alasoo E.D., Lorenz N., Kumru B. Resveratrol Triepoxy-Based High-Performance Resin Formulation and Carbon Fiber-Reinforced Composite Processing for Structural Applications. *ACS Omega*. 2025;10(42):49887–49895. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c05906>
14. Ratna D. Modification of epoxy resins for improvement of adhesion: a critical review. *J. Adhesion Sci. Technol.* 2003;17(12): 1655–1668. <https://doi.org/10.1163/156856103322396721>
15. Chikhi N., Fellahi S., Bakar M. Modification of epoxy resin using reactive liquid (ATBN) rubber. *Eur. Polym. J.* 2002;38(2): 251–264. [https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(01\)00194-X](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(01)00194-X)
16. Al-Shiblawi K.A., Pershin V.F., Yartsev V.P. Modification of Epoxy Resins: Modern Condition and Prospects. Part I. Modification of Nanoparticles. *AM&T*. 2018;2:68–78. <https://doi.org/10.17277/amt.2018.02.pp.068-078>
17. Ma H., Aravand A., Falzon B.G. Synergistic enhancement of fracture toughness in multiphase epoxy matrices modified by thermoplastic and carbon nanotubes. *Composit. Sci. Technol.* 2021;201:108523. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108523>
18. Wang D., Hou L., Zhao L., et al. Preparation of PEK-C-toughened epoxy structural adhesive for bonding CF/PEEK composites. *J. Appl. Polym. Sci.* 2024;141(42):e56093. <https://doi.org/10.1002/app.56093>
19. Sarath Kumar P., Jayanarayanan K., Balachandran M. Performance comparison of carbon fiber reinforced polyaryletherketone and epoxy composites: Mechanical properties, failure modes, cryo-thermal behavior, and finite element analysis. *J. Appl. Polym. Sci.* 2022;139(29):e52494. <https://doi.org/10.1002/app.52494>
20. Taubert M., Diez J.G., Musil B., Höfer P. Comparing interphase formation in different thermoplastics combined with RTM6/M18 epoxy systems. *Advanced Manufacturing: Polym. Composit. Sci.* 2025;11(1):2482280. <https://doi.org/10.1080/20550340.2025.2482280>
21. Zhou J., Zhang C., Cheng C., et al. Synergetic Improvement of Interlaminar Fracture Toughness in Carbon Fiber/Epoxy Composites Interleaved with PES/PEK-C Hybrid Nanofiber Veils. *Adv. Fiber Mater.* 2022;4(5):1081–1093. <https://doi.org/10.1007/s42765-022-00160-9>
22. Korokhin R.A., Solodilov V.I., Zvereva U.G., Solomatina D.V., Gorbakina Yu.A., Shapagin A.V. Epoxy polymers modified with polyetherimide. Part I: rheological and thermomechanical characteristics. *Polym. Bull.* 2021;78(3):1573–1584. <https://doi.org/10.1007/s00289-020-03174-8>
23. Wen Y., Liu X., Liu L. Improving Epoxy Resin Performance Using PPG and MDI by One-Step Modification. *Processes*. 2022;10(5):929. <https://doi.org/10.3390/pr10050929>
24. Bajpai A., Davidson J.R., Robert C. Studies on the Modification of Commercial Bisphenol-A-Based Epoxy Resin Using Different Multifunctional Epoxy Systems. *Appl. Mech.* 2021;2(2):419–430. <https://doi.org/10.3390/applmech2020023>
25. Anurangi J., Jayalath S., Senevirathna S.R., Herath M., Epaarachchi J. Enhanced thermo-mechanical properties of carbon fiber reinforced thermoresistant polymer, a blend of di-functional epoxy bisphenol A and a tri-functional epoxy Tactix 742. *Polym. Composit.* 2024;45(12):10898–10910. <https://doi.org/10.1002/pc.28517>
26. Cicala G., Mannino S., Latteri A., Ognibene G., Saccullo G. Effects of mixing di- and tri-functional epoxy monomers on epoxy/thermoplastic blends. *Adv. Polym. Technol.* 2018;37(6):1868–1877. <https://doi.org/10.1002/adv.21845>
27. Khalina M., Beheshty M.H., Salimi A. The effect of reactive diluent on mechanical properties and microstructure of epoxy resins. *Polym. Bull.* 2019;76(8):3905–3927. <https://doi.org/10.1007/s00289-018-2577-6>
28. Pastamokienė L., Jonikaitė-Švėgždienė J., Lapinskaitė N., et al. The effect of reactive diluents on curing of epoxy resins and properties of the cured epoxy coatings. *J. Coat. Technol. Res.* 2023;20(4): 1207–1221. <https://doi.org/10.1007/s11998-022-00737-4>
29. Yuan Q., Wang Z., Yao H., Huang J., Zuo S., Huang H. Comparative study of reactive diluents with different molecular structures on the curing properties of epoxy adhesives and the interface bonding properties with mortar. *Int. J. Adhesion Adhesives*. 2023;126:103473. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103473>
30. Li J., Zhao H., Sui G. Renewable green reactive diluent for bisphenol A epoxy resin system: curing kinetics and properties. *RSC Adv.* 2022;12(49):31699–31710. <https://doi.org/10.1039/D2RA05160E>
31. Malburet S., Bertrand H., Richard C., Lacabanne C., Dantras E., Graillet A. Biobased epoxy reactive diluents prepared from monophenol derivatives: effect on viscosity and glass transition temperature of epoxy resins. *RSC Adv.* 2023;13(22): 15099–15106. <https://doi.org/10.1039/d3ra01039b>
32. Tang Y., Fairclough J.P.A. Electric Conductivity Enhancement in Conductive Carbon Black (Cb) Thermosetting Polymer Composite: A Study on Dispersion and Ust-Type Phase Separation Dynamics. *SSRN*. Preprint posted online 2024. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4858464>
33. Shapagin A.V., Budylin N.Yu., Chalykh A.E., Solodilov V.I., Korokhin R.A., Poteryaev A.A. Phase Equilibrium, Morphology, and Physico-Mechanics in Epoxy–Thermoplastic Mixtures with Upper and Lower Critical Solution Temperatures. *Polymers*. 2020;13(1):35. <https://doi.org/10.3390/polym13010035>
34. Plyusnina I.O., Nikulova U.V., Shapagin A.V. Phase equilibria, diffusion and structure in the initial and cured polylactide – epoxy resin system. *Polymer*. 2025;336:128866. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2025.128866>
35. Fan R., Zhang L., Liu Y., et al. Effect of Poly(ether imide) on the Mechanical Properties of Epoxy Resin under Extreme Environmental Conditions. *ACS Appl. Polym. Mater.* 2025;7(19):13321–13331. <https://doi.org/10.1021/acscpm.5c02744>

Об авторах

Мешалкин Валерий Павлович, академик Российской академии наук, д.т.н., профессор, профессор кафедры логистики и экономической информатики, ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (125047, Россия, Москва, Миусская пл., д. 9). E-mail: meshalkin.v.p@muctr.ru. Scopus Author ID 7003598541, ResearcherID T-6913-2017, SPIN-код РИНЦ 9443-7847, <https://orcid.org/0000-0001-6956-6705>

Лукашов Николай Игоревич, ассистент, кафедра технологии переработки пластмасс, ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (125047, Россия, Москва, Миусская пл., д. 9). E-mail: lukashov.n.i@muctr.ru. Scopus Author ID 57638358600, ResearcherID MDS-8082-2025, SPIN-код РИНЦ 2103-0609, <https://orcid.org/0009-0005-8374-9635>

Гарт Анна Александровна, студент, ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (125047, Россия, Москва, Миусская пл., д. 9). E-mail: mccancer@mail.ru. ResearcherID KMX-4328-2024, <https://orcid.org/0009-0007-4882-9423>

Потужный Илья Сергеевич, студент, ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (125047, Россия, Москва, Миусская пл., д. 9). E-mail: potuzhny2002@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0007-5924-9440>

Полунин Степан Владимирович, к.х.н., доцент, кафедра технологии переработки пластмасс, ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (125047, Россия, Москва, Миусская пл., д. 9). E-mail: polunin.s.v@muctr.ru. Scopus Author ID 57214461159, ResearcherID AGU-0493-2022, SPIN-код РИНЦ 6299-9928, <https://orcid.org/0000-0003-1732-9999>

Горбунова Ирина Юрьевна, д.х.н., профессор, заведующая кафедрой технологии переработки пластмасс, ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (125047, Россия, Москва, Миусская пл., д. 9). E-mail: giyl61@yandex.ru. Scopus Author ID 7006042682, ResearcherID D-4732-2014, SPIN-код РИНЦ 6969-3346, <https://orcid.org/0000-0002-0390-9100>

Межуев Ярослав Олегович, д.х.н., доцент, заведующий кафедрой биоматериалов, ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (125047, Россия, Москва, Миусская пл., д. 9). E-mail: mezhuev.i.o@muctr.ru. Scopus Author ID 57214030248, SPIN-код РИНЦ 2712-0505, <https://orcid.org/0000-0003-3075-9010>

Беляева Евгения Алексеевна, к.т.н., заведующая лабораторией листовых и рулонированных стеклопластиков, АО «НПО Стеклопластик имени Н.Н. Трофимова» (141551, Московская область, г.о. Солнечногорск, ПГТ Андреевка, стр. 3А, Россия). E-mail: evgeniya284@mail.ru.

About the Authors

Valery P. Meshalkin, Academician at the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Logistics and Economic Computer Science Department, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (9, Miusskaya pl., Moscow, 125047, Russia). E-mail: meshalkin.v.p@muctr.ru. Scopus Author ID 7003598541, ResearcherID T-6913-2017, RSCI SPIN-code 9443-7847, <https://orcid.org/0000-0001-6956-6705>

Nikolay I. Lukashov, Assistant, Plastic Processing Technology Department, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (9, Miusskaya pl., Moscow, 125047, Russia). E-mail: lukashov.n.i@muctr.ru. Scopus Author ID 57638358600, ResearcherID MDS-8082-2025, RSCI SPIN-code 2103-0609, <https://orcid.org/0009-0005-8374-9635>

Anna A. Gart, Student, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (9, Miusskaya pl., Moscow, 125047, Russia). E-mail: mccancer@mail.ru. ResearcherID KMX-4328-2024, <https://orcid.org/0009-0007-4882-9423>

Ilya S. Potuzhny, Student, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (9, Miusskaya pl., Moscow, 125047, Russia). E-mail: potuzhny2002@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0007-5924-9440>

Stepan V. Polunin, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Plastic Processing Technology Department, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (9, Miusskaya pl., Moscow, 125047, Russia). E-mail: polunin.s.v@muctr.ru. Scopus Author ID 57214461159, ResearcherID AGU-0493-2022, RSCI SPIN-code 6299-9928, <https://orcid.org/0000-0003-1732-9999>

Irina Yu. Gorbunova, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Head of the Plastic Processing Technology Department, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (9, Miusskaya pl., Moscow, 125047, Russia). E-mail: giyl61@yandex.ru. Scopus Author ID 7006042682, ResearcherID D-4732-2014, RSCI SPIN-code 6969-3346, <https://orcid.org/0000-0002-0390-9100>

Yaroslav O. Mezhev, Dr. Sci. (Chem.), Associate Professor, Head of the Biomaterials Department, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (9, Miusskaya pl., Moscow, 125047, Russia). E-mail: mezhuev.i.o@muctr.ru. Scopus Author ID 57214030248, RSCI SPIN-code 2712-0505, <https://orcid.org/0000-0003-3075-9010>

Evgeniya A. Belyaeva, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Sheet and Rolled Fiberglass Products Laboratory, NPO Stekloplastik (3A, Andreevka, Solnechnogorsk, Moscow oblast, 141551, Russia). E-mail: evgeniya284@mail.ru.

Отпечатано в МИРЭА – Российском технологическом университете.

119454, РФ, Москва, пр-т Вернадского, д. 78.

Подписано в печать 29.06.2026.

Формат 60×90/8. Печать цифровая. Уч.-изд. листов 13.5.

Тираж 50 экз. Заказ № 4202.

Printed in MIREA – Russian Technological University.

78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454, Russian Federation.

Signed to print on June 29, 2026.

Format 60×90/8. Digital print. C.p.l. 13.5.

50 copies. Order no. 4202.

Подписку на печатную версию журнала

Tonkie khimicheskie tekhnologii = *Fine Chemical Technologies*

можно оформить через ООО «Агентство «Книга-Сервис»,

www.akc.ru. Подписной индекс: 36924.

Subscription to the

Tonkie Khimicheskie Tekhnologii = *Fine Chemical Technologies*

printed version can be made through the *Kniga-Servis* Agency,

www.akc.ru. Subscription index: 36924.