

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

УДК 678

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-6-528-535>

EDN UMETEK



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Осцилляционная реометрия процесса отверждения эпоксидных связующих, модифицированных полиэфиримидом

С.В. Полунин¹, К.А. Атамас¹, И.Ю. Горбунова¹, П.А. Морозова¹, К.М. Мараховский²

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

² Межотраслевой институт переработки пластмасс – НПО «Пластик», Москва, 121059 Россия

✉ Автор для переписки, e-mail: mcnion@gmail.com

Аннотация

Цели. Определение влияния полиэфиримида на процесс отверждения эпоксидных связующих.

Методы. Методом осцилляционной реометрии фиксировали зависимость модуля накопления и модуля потерь эпоксидных систем от времени отверждения на приборе MCR 302 фирмы Anton Paar с частотой колебаний 1 Гц и амплитудой, соответствующей области линейной вязкоупругости, при трех температурах 160, 170 и 180°C. По полученным зависимостям определяли точку кроссовера при равенстве составляющих комплексного модуля упругости.

Результаты. Установлено влияние полиэфиримида на процесс отверждения эпоксидных связующих при содержании термопласта от 5 до 20 мас. ч. на 100 мас. ч. эпоксидного олигомера при трех температурах. Для системы, модифицированной 20 мас. ч. полиэфиримида, зафиксировано фазовое разделение в процессе сшивания. В системах, содержащих 10 и 20 мас. ч. полиэфиримида, предельное значение модуля упругости оказывается выше при 170°C, чем при 180°C.

Выводы. Введение полиэфиримида в эпоксидные связующие в количестве 5–20 мас. ч. увеличивает время достижения точки кроссовера. При этом наиболее сильно замедляется процесс отверждения для системы, содержащей 10 мас. ч. термопласта, время достижения точки кроссовера которой оказывается наибольшим при всех трех температурах эксперимента.

Ключевые слова

осцилляционная реометрия, точка кроссовера, эпоксидный олигомер, полиэфиримид, разделение фаз

Поступила: 15.07.2024

Доработана: 10.09.2024

Принята в печать: 18.10.2024

Для цитирования

Полунин С.В., Атамас К.А., Горбунова И.Ю., Морозова П.А., Мараховский К.М. Осцилляционная реометрия процесса отверждения эпоксидных связующих, модифицированных полиэфиримидом. *Тонкие химические технологии*. 2024;19(6):528–535. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-6-528-535>

RESEARCH ARTICLE

Oscillation rheometry of curing process of epoxy binders modified with polyetherimide

Stepan V. Polunin¹, Kirill A. Atamas¹, Irina Yu. Gorbunova¹, Polina A. Morozova¹,
Konstantin M. Marakhovsky²

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

² *MIPP – NPO “Plastik,” Moscow, 121059 Russia*

✉ *Corresponding author; e-mail: mcnion@gmail.com*

Abstract

Objectives. The aim of this study is to ascertain the influence of polyetherimide on the curing process of epoxy binders.

Methods. The storage modulus and loss modulus of epoxyamine systems were measured as a function of curing time on the Anton Paar MCR 302 rheometer. The experiments were carried out at an oscillation frequency of 1 Hz, with an amplitude aligned with the linear viscoelasticity region, and across a range of temperatures (160, 170, and 180°C). The crossover point was determined when the components of the complex modulus of elasticity are equal according to the obtained dependencies.

Results. The influence of polyetherimide on the curing process of epoxyamine binders was investigated at a thermoplastic content of 5 to 20 pts. wt at three temperatures. In a system modified with 20 pts. wt of polyetherimide, phase separation was observed during the curing process. In systems modified with 10 and 20 pts. wt of polyetherimide, the limiting value of the modulus of elasticity was observed to be higher at 170°C than at 180°C.

Conclusions. The modification of epoxyamine binders with thermoplastic in an amount of 5–20 pts. wt has been observed to extend the time required to reach the crossover point. Furthermore, the curing process markedly slows down in the system comprising 10 pts. wt of thermoplastic content, in which it takes the longest time to reach the crossover point at all three experimental temperatures.

Keywords

oscillation rheometry, crossover point, epoxy oligomer, polyetherimide, phase separation

Submitted: 15.07.2024

Revised: 10.09.2024

Accepted: 18.10.2024

For citation

Polunin S.V., Atamas K.A., Gorbunova I.Yu., Morozova P.A., Marakhovsky K.M. Oscillation rheometry of curing process of epoxy binders modified with polyetherimide. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2024;19(6):528–535. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-6-528-535>

ВВЕДЕНИЕ

Эпоксидные смолы используются в качестве связующих в армированных пластиках во многих отраслях промышленности. Достоинствами данного класса соединений являются хорошая адгезия, высокие диэлектрические свойства, низкая усадка при отверждении, химическая стойкость [1]. Используя отвердители горячего отверждения, можно достичь относительно высокой теплостойкости эпоксидных полимеров, однако недостатком данных материалов является низкая трещиностойкость и ударная вязкость, что ограничивает их сферу применения.

Повысить стойкость эпоксидных полимеров к хрупкому разрушению можно путем модификации их термопластами [2–4]. По сравнению с модификацией каучуками и активными разбавителями данный

способ имеет преимущество в том, что не происходит снижения температуры стеклования отвержденного эпоксидного олигомера [5, 6].

Изначально совместимая система эпоксидного олигомера и термопласта в большинстве случаев претерпевает фазовый распад в процессе отверждения ввиду увеличения молекулярной массы сшитого полимера, а образование новой структуры способствует повышению физико-механических свойств [7]. При этом образуются различные типы структур в отвержденных полимерах [8]. В работе [9] продемонстрированы примеры протяженных структур с прямой и обратной “матрицей-дисперсией”, где дисперсионной средой является реактопласт и термопласт соответственно.

Введение термопластов в эпоксидные олигомеры существенно меняет их свойства, в том числе вязкость, в связи с чем интересно исследовать

процесс отверждения модифицированных систем. Для измерения вязкости и определения времени гелеобразования можно использовать ротационную или осцилляционную реометрию [10]. В ходе последней фиксируются зависимости двух составляющих комплексного модуля ($|G^*|$): модуля накопления G' и модуля потерь G'' от времени. Момент пересечения значений этих параметров, именуемый точкой кроссовера, ассоциируется в литературе с гелеобразованием в системе [11]. В эпоксидных связующих, модифицированных термопластами, выделение фазы, обогащенной более вязким компонентом, происходит до гелеобразования. Поэтому методами ротационной или осцилляционной реометрии иногда удается зафиксировать момент фазового разделения — ему соответствуют характерные изломы на зависимостях сдвиговой вязкости или модуля потерь от времени отверждения [12].

Ранее исследовали процесс отверждения эпоксидного олигомера, модифицированного кардовым сополимером полисульфона ПСФФ-70К, методом ротационной реометрии в режиме постоянного сдвига [13]. Для системы, содержащей 10 мас. ч. термопласта, на 30-й минуте при температуре эксперимента 180°C происходит некоторое снижение сдвиговой вязкости, что говорит о фазовом разделении в процессе структурирования. Интересно, что для модифицированного 5 мас. ч. ПСФФ-70К связующего зафиксировано наибольшее время гелеобразования по сравнению с немодифицированным связующим, что, вероятно, может быть связано с тем, что при таком содержании модификатора не происходит фазового разделения смеси.

Модифицирование эпоксидного олигомера полиэфиримидом (ПЭИ) изучали также в работе [14]. На инфракрасных спектрах отвержденного эпоксидного полимера, содержащего 2% по массе ПЭИ, авторы наблюдали смещение в сторону меньших волновых чисел пика, характерного для гидроксильной группы, которая содержится и в исходном эпоксидиановом олигомере и образуется после реакции эпоксидного цикла с аминогруппой. Это, вероятно, можно объяснить возникновением водородных связей между гидроксильными группами эпоксидного полимера и имидными группами ПЭИ.

Целью данной работы является изучение процесса отверждения эпоксидных связующих, модифицированных ПЭИ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Связующие готовили на основе эпоксидного олигомера ЭД-20 (ГОСТ 10587-84¹, Завод им. Я.М. Свердлова, Россия). В качестве термопластичного модификатора использовали ПЭИ марки Ultem 1010 (Sabic, США), который добавляли в ЭД-20 при 160°C в количестве 5, 10, 15 и 20 мас. ч. на 100 мас. ч. эпоксидного олигомера и перемешивали при помощи верхнеприводной мешалки до получения гомогенных растворов при температуре 160–180°C. В качестве отвердителя для связующих использовали 4,4'-диаминодифенилсульфон, на подрисовочных подписях это не указано. Отвердители смешивали в течение 30 мин при 120°C в количестве 30 мас. ч. на 100 мас. ч. ЭД-20, что близко к стехиометрическому соотношению.

Осцилляционную реометрию проводили в измерительной системе плоскость–плоскость с рабочим зазором 1 мм на реометре MCR 302 фирмы Anton Paar (Австрия) при частоте колебаний $\omega = 1$ Гц и амплитуде, соответствующей области линейной вязкоупругости. Эксперименты проводили при трех различных температурах: 160, 170 и 180°C. Перед экспериментом связующие предварительно разогревали в термощкафу до 130°C, после чего переносили на нижнюю неподвижную плоскость прибора, выставляли зазор и разогревали связующие до температуры измерения. В ходе экспериментов фиксировали зависимости модуля накопления G' и модуля потерь G'' от времени отверждения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее в исследованиях было показано, что система эпоксид–ПЭИ совместима до процесса отверждения и характеризуется верхней критической температурой смешения, равной 40°C. Также было установлено, что начальная вязкость эпоксидных смол, модифицированных ПЭИ, составляет от 2 до 6 кПа·с при комнатной температуре [15].

На рис. 1 представлены зависимости модуля накопления и модуля потерь от времени отверждения эпоксидных связующих в полулогарифмических координатах при трех температурах.

На начальном этапе процесса отверждения модуль потерь G'' оказывается выше, чем модуль накопления G' , что связано с неспособностью жидкостей запасть энергию при механическом нагружении, однако в процессе отверждения составляющие комплексного

¹ ГОСТ 10587-84. Государственный стандарт Союза ССР. Смолы эпоксидно-диановые неотвержденные. Технические условия. М.: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам; 1985 г. [GOST 10587-84. State Standard of the USSR. Uncured epoxy resins. Specifications. Moscow: USSR State Committee for Product Quality Management and Standards; 1985.]

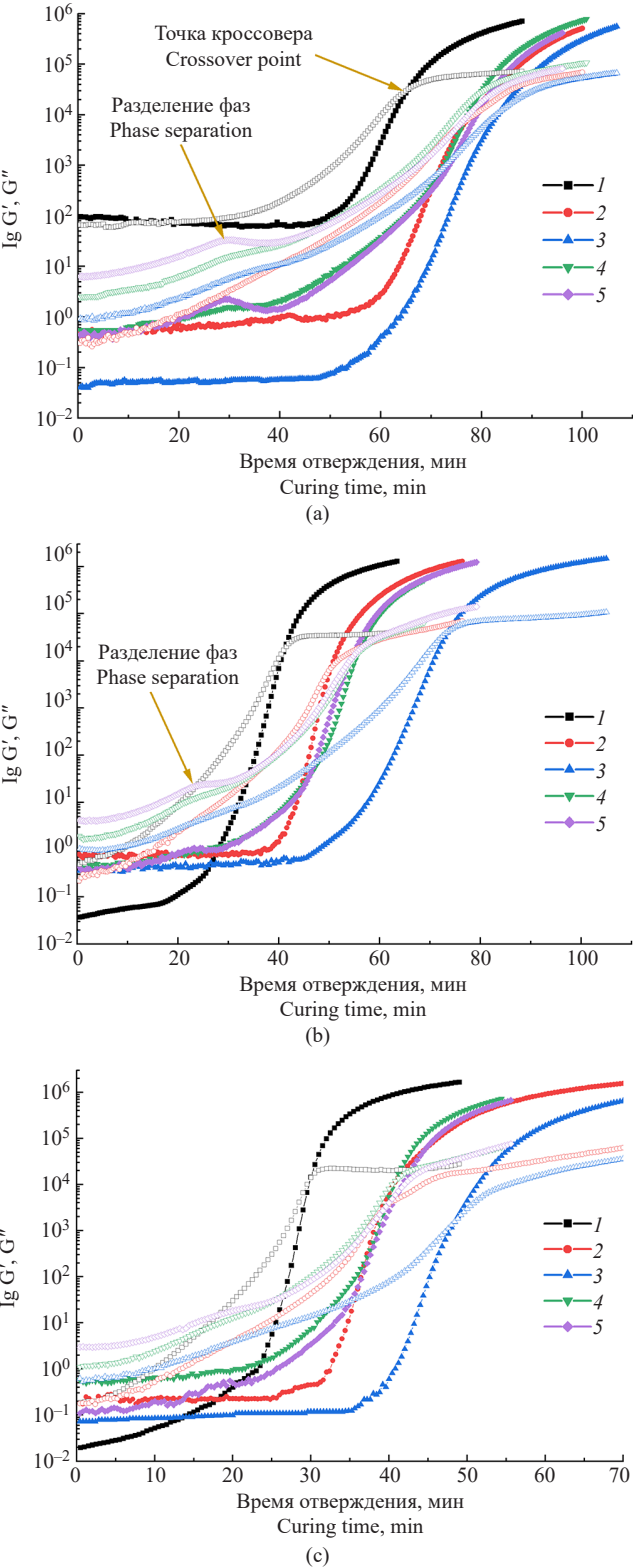


Рис. 1. Зависимость модуля накопления G' (сплошные символы) и модуля потерь G'' (полые символы) от времени отверждения: (1) ЭД-20, (2) ЭД-20+ПЭИ (5 мас. ч.), (3) ЭД-20+ПЭИ (10 мас. ч.), (4) ЭД-20+ПЭИ (15 мас. ч.), (5) ЭД-20+ПЭИ (20 мас. ч.), при 160 (а), 170 (б) и 180°C (с)

Fig. 1. Dependence of storage modulus G' (solid symbols) and loss modulus G'' (hollow symbols) on curing time: (1) ED-20, (2) ED-20+PEI (5 pts. wt), (3) ED-20+PEI (10 pts. wt), (4) ED-20+PEI (15 pts. wt), (5) ED-20+PEI (20 pts. wt), at 160 (a), 170 (b), and 180°C (c)

модуля упругости растут. В определенный момент G' оказывается выше G'' , и исследуемая система приобретает характеристики твердого тела. Этот момент времени называют точкой кроссовера ($G' = G''$) и ассоциируют с гелеобразованием. Точка кроссовера отвечает моменту появления непрерывной сетки химических связей, которые образуются в процессе отверждения. Время достижения точки кроссовера больше в эпоксидных связующих с термопластичными модификаторами по сравнению с немодифицированной ЭД-20 примерно на 18–33 мин. Это, вероятно, связано с замедлением процесса отверждения, т.е. замедлением образования сетки химических связей в эпоксидном связующем в присутствии ПЭИ, поскольку термопласт разбавляет реакционноспособную систему и повышает ее вязкость, что коррелирует с литературными данными [15]. В таблице ниже приведены рассчитанные по рис. 1 времена достижения точек кроссовера.

Таблица. Времена достижения точек кроссовера исследуемых связующих

Table. Times of reaching the crossover points of the studied binders

Образец Sample	Время точки кроссовера, мин Time of the crossover point, min		
	160°C	170°C	180°C
ЭД-20 ED-20	66	41	30
ЭД-20+ПЭИ (5 мас. ч.) ED-20+PEI (5 pts. wt)	77	50	39
ЭД-20+ПЭИ (10 мас. ч.) ED-20+PEI (10 pts. wt)	84	74	48
ЭД-20+ПЭИ (15 мас. ч.) ED-20+PEI (15 pts. wt)	80	56	41
ЭД-20+ПЭИ (20 мас. ч.) ED-20+PEI (20 pts. wt)	81	55	41

Из рис. 1а и 1б видно, что в системе, содержащей 20 мас. ч. ПЭИ (кривая 5) при 160°C на 29-й минуте (рис. 1а) и при 170°C 23-й минуте эксперимента (рис. 1б) наблюдается снижение значения модуля потерь, который связан с динамической вязкостью следующим соотношением:

$$\eta' = \frac{G''}{\omega},$$

где η' — динамическая вязкость, Па·с; G'' — модуль потерь, Па; ω — частота, рад/с. Это значит, что зависимость модуля потерь носит качественно тот же

характер, что и зависимость динамической вязкости при условии постоянства частоты в процессе эксперимента. Следовательно, можно сделать предположение, что снижение значения модуля потерь происходит из-за выделения вязкого компонента — ПЭИ — из реакционной системы в отдельную фазу. В этот момент процесс отверждения перестает быть гомогенным и начинает носить гетерогенный характер. Далее, вследствие продолжающегося процесса отверждения, модуль потерь системы снова нарастает.

Известно, что в технологии армированных пластиков существует понятие о технологическом параметре — жизнеспособности связующего, за который принимают время достижения некоторого уровня вязкости, выше которого связующее уже не способно пропитывать армирующий наполнитель. Часто этот параметр принимают равным $\approx 100 \text{ Па}\cdot\text{с}$ [1, 11]. Из рис. 2 можно сделать вывод, что система, содержащая 10 мас. ч. ПЭИ (кривая синего цвета), обладает повышенной (примерно на 15–27 мин) жизнеспособностью по сравнению с другими исследованными в работе связующими. Это является несомненным преимуществом модифицированного термопластом связующего по сравнению с чистым ЭД-20, т.к. увеличивается «технологическое окно» для переработки материала в изделия из композитов. Следует отметить, что эпоксидные связующие являются ньютоновскими жидкостями при повышенных

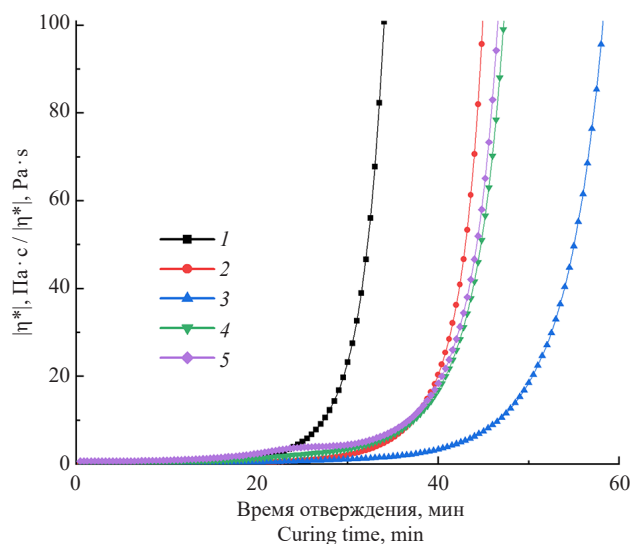


Рис. 2. Зависимость комплексной вязкости ($|\eta^*|$) от времени отверждения при температуре 170°C : (1) ЭД-20, (2) ЭД-20+ПЭИ (5 мас. ч.), (3) ЭД-20+ПЭИ (10 мас. ч.), (4) ЭД-20+ПЭИ (15 мас. ч.), (5) ЭД-20+ПЭИ (20 мас. ч.)

Fig. 2. Dependence of complex viscosity ($|\eta^*|$) on curing time at 170°C : (1) ED-20, (2) ED-20+PEI (5 pts. wt), (3) ED-20+PEI (10 pts. wt), (4) ED-20+PEI (15 pts. wt), (5) ED-20+PEI (20 pts. wt)

температурах [15, 16], поэтому комплексную вязкость можно справедливо принять за эффективную, основываясь на правиле Кокса–Мерца.

Чем больше температура, тем интенсивнее протекает процесс отверждения, и следовало бы предположить, что предельное значение модуля накопления окажется выше при 180°C . На практике предельное значения модуля упругости оказывается выше при 170°C , как показано на рис. 3.

Дело в том, что на модуль упругости оказывает влияние температура эксперимента. Известно, что с увеличением температуры модуль упругости снижается, поэтому при 180°C уменьшение предельного значения модуля упругости из-за более высокой температуры превалирует над его повышением вследствие отверждения.

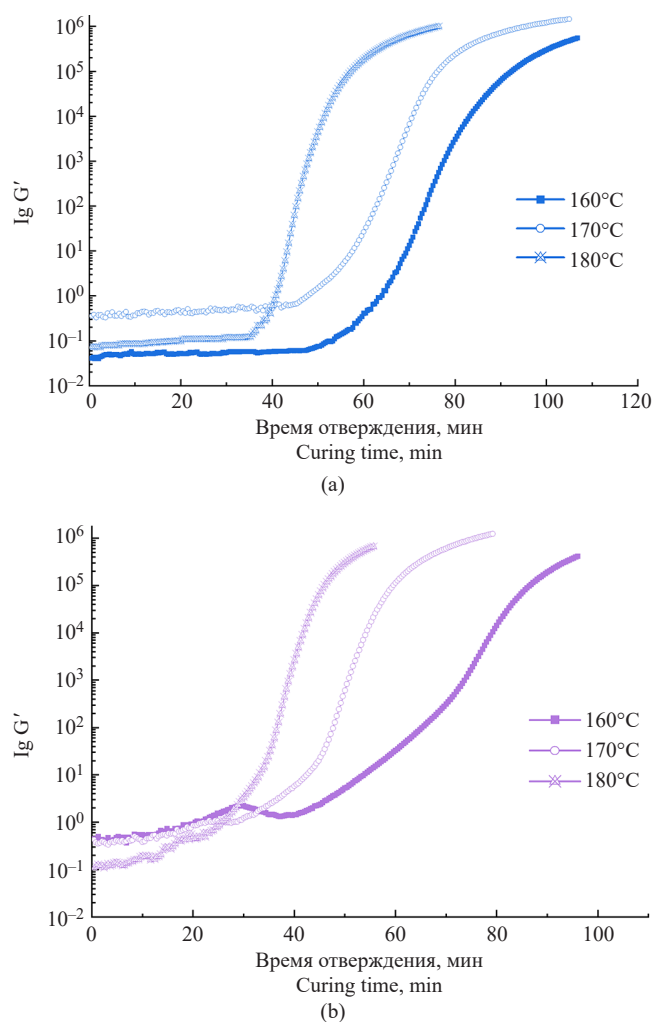


Рис. 3. Зависимость модуля накопления (G') от времени отверждения при трех температурах: (а) ЭД-20+ПЭИ (10 мас. ч.), (б) ЭД-20+ПЭИ (20 мас. ч.)

Fig. 3. Dependence of storage modulus (G') on curing time at three temperatures: (a) ED-20+PEI (10 pts. wt), (b) ED-20+PEI (20 pts. wt)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В исследовании установлено, что добавление термопластичного модификатора к эпоксидному связующему увеличивает время гелеобразования, что обусловлено как замедлением процесса отверждения в присутствии термопласта, поскольку он разбавляет реакционную систему, так и повышением вязкости самого модифицированного связующего по сравнению с немодифицированным. Наибольшая жизнеспособность зафиксирована для системы, модифицированной 10 мас. ч. ПЭИ. Предельное значение модуля упругости оказывается выше при температуре отверждения 170°C, чем при 180°C, что объясняется двойственным влиянием температуры.

Вклад авторов

С.В. Полунин — проведение экспериментов, обработка полученных данных, обсуждение полученных результатов, участие в редактировании текста статьи.

К.А. Атамас — обработка полученных данных, поиск научных публикаций по теме статьи, написание и оформление текста статьи.

И.Ю. Горбунова — постановка задачи, планирование экспериментов, анализ и обсуждение результатов, редактирование текста статьи.

П.А. Морозова — проведение экспериментов, обсуждение полученных результатов.

К.М. Мараховский — планирование экспериментов, обсуждение полученных результатов, участие в редактировании текста статьи.

Authors' contributions

S.V. Polunin — conducting experiments, processing the data obtained, discussing the results obtained, and participating in editing the text of the article.

K.A. Atamas — processing the obtained data, literature review on the topic of the article, writing and formatting the text of the article.

I.Yu. Gorbunova — research idea, planning experiments, analyzing and discussing the results, and editing the text of the article.

P.A. Morozova — conducting experiments and discussing the results obtained.

K.M. Marakhovsky — planning experiments, discussing the results obtained, and participating in editing the text of the article.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interest.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С., Горбаткина Ю.А., Крыжановский В.К., Куперман А.М., Симонов-Емельянов И.Д., Халиулин В.И., Бунаков В.А. *Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология*. 6-е изд. СПб.: ЦОП «Профессия»; 2024. 712 с. ISBN 978-5-91844-136-5
2. Chen F., Zhang Y., Sun T., Han C.C. Miscibility, Phase Separation and Mechanism of Phase Separation in Epoxy/Thermoplastic Blends. In: Parameswaranpillai J., Hameed N., Pionteck J., Woo E. (Eds.). *Handbook of Epoxy Blends*. Springer; 2017. P. 487–521. http://doi.org/10.1007/978-3-319-40043-3_17
3. Chen Z., Luo Z., Huang Z., Cai C., Tusiime R., Li Z., Wang H., Cheng C., Liu Y., Sun Z., Zhang H., Yu J. Synergistic toughen epoxy resin by incorporation of polyetherimide and amino groups grafted MWCNTs. *Composit. Commun.* 2020;21(8):100377. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100377>
4. Sun Z., Xu L., Chen Z., Wang Y., Tusiime R., Cheng C., Zhou S., Liu Y., Yu M., Zhang H. Enhancing the Mechanical and Thermal Properties of Epoxy Resin via Blending with Thermoplastic Polysulfone. *Polymers*. 2019;11(3):461–478. <https://doi.org/10.3390/polym11030461>
5. Yu G., Wu P. Effect of chemical modified graphene oxide on the phase separation behaviour and properties of an epoxy/polyetherimide binary system. *Polym. Chem.* 2014;5(1):96–104. <https://doi.org/10.1039/C3PY00878A>
6. Бресская А.Д., Трофимов Д.А., Симонов-Емельянов И.Д., Шалгунов С.И., Соколов В.И. Исследование поверхностного натяжения и углов смачивания для создания эффективных полимерных связующих на основе эпоксидных олигомеров с активными разбавителями. *Тонкие химические технологии*. 2020;15(3):47–57. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2020-15-3-47-57>

REFERENCES

1. Kerber M.L., Vinogradov V.M., Golovkin G.S., et al. *Polimernye kompozitsionnye materialy: struktura, svoistva, tekhnologiya (Polymer Composite Materials: Structure, Properties, Technology)*. St. Petersburg: Professiya; 2024. 712 p. (in Russ.). ISBN 978-5-91844-136-5
2. Chen F., Zhang Y., Sun T., Han C.C. Miscibility, Phase Separation and Mechanism of Phase Separation in Epoxy/Thermoplastic Blends. In: Parameswaranpillai J., Hameed N., Pionteck J., Woo E. (Eds.). *Handbook of Epoxy Blends*. Springer; 2017. P. 487–521. http://doi.org/10.1007/978-3-319-40043-3_17
3. Chen Z., Luo Z., Huang Z., Cai C., Tusiime R., Li Z., Wang H., Cheng C., Liu Y., Sun Z., Zhang H., Yu J. Synergistic toughen epoxy resin by incorporation of polyetherimide and amino groups grafted MWCNTs. *Composit. Commun.* 2020;21(8):100377. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100377>
4. Sun Z., Xu L., Chen Z., Wang Y., Tusiime R., Cheng C., Zhou S., Liu Y., Yu M., Zhang H. Enhancing the Mechanical and Thermal Properties of Epoxy Resin via Blending with Thermoplastic Polysulfone. *Polymers*. 2019;11(3):461–478. <https://doi.org/10.3390/polym11030461>
5. Yu G., Wu P. Effect of chemical modified graphene oxide on the phase separation behaviour and properties of an epoxy/polyetherimide binary system. *Polym. Chem.* 2014;5(1):96–104. <https://doi.org/10.1039/C3PY00878A>
6. Bresskaya A.D., Trofimov D.A., Simonov-Emel'yanov I.D., Shalgunov S.I., Sokolov V.I. Investigation of surface tension and contact angles for effective polymer binders based on epoxy oligomers and active diluents. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2020;15(3):47–57. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2020-15-3-47-57>

7. Muthalif M., Choe Y. Influence of Maleinized Polybutadiene on Adhesive Strenght and Toughness of Epoxy Resins. *Int. J. Polym. Sci.* 2022;2022(1):1–8. <https://doi.org/10.1155/2022/9517467>
8. Deng H., Yuan L., Gu A., Liang G. Facile strategy and mechanism of great toughening epoxy resin using polyethersulfone through controlling phase separation with microwave-assisted thermal curing technique. *J. Appl. Polym. Sci.* 2019;137(8):48394. <http://doi.org/10.1002/app.48394>
9. 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*. 2021;13(1):35–47. <https://doi.org/10.3390/polym13010035>
10. Johnson L.M., Huffman N.D. Rheology of Epoxy/Thermoplastic Blends. In: Parameswaranpillai J., Hameed N., Pionteck J., Woo E. (Eds.). *Handbook of Epoxy Blends*. Springer; 2017. P. 613–648. http://doi.org/10.1007/978-3-319-40043-3_21
11. Аринина М.П., Костенко В.А., Горбунова И.Ю., Ильин С.О., Малкин А.Я. Кинетика отверждения эпоксидного олигомера диаминодифенилсульфоном. Реология и калориметрия. *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. 2018;60(5):418–425. <https://doi.org/10.1134/S2308112018050012>
12. Cicala G., Mamo A., Latteri A., Recca G. Epoxy/thermoplastic blends: the effect of two different aromatic modifiers. *J. Mater. Des. Appl.* 2011;225(4):316–326. <http://doi.org/10.1177/1464420711411397>
13. Polunin S.V., Gorbunova I.Yu., Kerber M.L., Khokhlova E.V., Kryuchkov I.A., Kravchenko T.P., Studying the Rheokinetics of Curing Processes in Epoxy Amine Binders Modified with Carding Polysulfon. *Polym. Sci. Ser. D*. 2023;16(4):824–829. <http://doi.org/10.1134/S1995421223040275>
14. Lee S.-Y., Kang M.-J., Kim S.-H., Rhee K.-Y., Lee J.-H., Park S.-J. Roles of Small Polyetherimide Moieties on Thermal Stability and Fracture Toughness of Epoxy Blends. *Polymers*. 2021;13(19):3310–3320. <http://doi.org/10.3390/polym13193310>
15. Аринина М.П., Ильин С.О., Макарова В.В., Горбунова И.Ю., Кербер М.Л., Куличихин В.Г. Совместимость и реологические свойства смесей эпоксидианового олигомера с ароматическими полиэфирами. *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. 2015;57(2):152–161. <https://doi.org/10.7868/S2308112015020017>
16. Guo Q., Zhu P., Li G., Huang L., Zhang Yu., Lu D., Sun R., Wong C.P. One-pot synthesis of bimodal silica nanospheres and their effects on the rheological and thermal-mechanical properties of silica-epoxy composites. *RSC Adv.* 2015;5(62):50073–50081. <https://doi.org/10.1039/C5RA06914A>
7. Muthalif M., Choe Y. Influence of Maleinized Polybutadiene on Adhesive Strenght and Toughness of Epoxy Resins. *Int. J. Polym. Sci.* 2022;2022(1):1–8. <https://doi.org/10.1155/2022/9517467>
8. Deng H., Yuan L., Gu A., Liang G. Facile strategy and mechanism of great toughening epoxy resin using polyethersulfone through controlling phase separation with microwave-assisted thermal curing technique. *J. Appl. Polym. Sci.* 2019;137(8):48394. <http://doi.org/10.1002/app.48394>
9. 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*. 2021;13(1):35–47. <https://doi.org/10.3390/polym13010035>
10. Johnson L.M., Huffman N.D. Rheology of Epoxy/Thermoplastic Blends. In: Parameswaranpillai J., Hameed N., Pionteck J., Woo E. (Eds.). *Handbook of Epoxy Blends*. Springer; 2017. P. 613–648. http://doi.org/10.1007/978-3-319-40043-3_21
11. Arinina M.P., Kostenko V.A., Gorbunova I.Yu., *et al.* Kinetics of curing of epoxy oligomer by diaminodiphenyl Sulfone: Rheology and calorimetry. *Polym. Sci. Ser. A*. 2018;60(5):683–690. <https://doi.org/10.1134/S0965545X18050012> [Original Russian Text: Arinina M.P., Kostenko V.A., Gorbunova I.Yu., Il'in S.O., Malkin A.Ya. Kinetics of curing of epoxy oligomer by diaminodiphenylsulfone. Rheology and calorimetry. *Vysokomolekulyarnye Soedineniya. Seriya A*. 2018;60(5):418–425 (in Russ.). <https://doi.org/10.1134/S2308112018050012>]
12. Cicala G., Mamo A., Latteri A., Recca G. Epoxy/thermoplastic blends: the effect of two different aromatic modifiers. *J. Mater. Des. Appl.* 2011;225(4):316–326. <http://doi.org/10.1177/1464420711411397>
13. Polunin S.V., Gorbunova I.Yu., Kerber M.L., Khokhlova E.V., Kryuchkov I.A., Kravchenko T.P., Studying the Rheokinetics of Curing Processes in Epoxy Amine Binders Modified with Carding Polysulfon. *Polym. Sci. Ser. D*. 2023;16(4):824–829. <http://doi.org/10.1134/S1995421223040275>
14. Lee S.-Y., Kang M.-J., Kim S.-H., Rhee K.-Y., Lee J.-H., Park S.-J. Roles of Small Polyetherimide Moieties on Thermal Stability and Fracture Toughness of Epoxy Blends. *Polymers*. 2021;13(19):3310–3320. <http://doi.org/10.3390/polym13193310>
15. Arinina M.P., Ilyin S.O., Makarova V.V., *et al.* Miscibility and rheological properties of epoxy resin blends with aromatic polyethers. *Polym. Sci. Ser. A*. 2015;57(2):177–185. <https://doi.org/10.1134/S0965545X15020017> [Original Russian Text: Arinina M.P., Ilyin S.O., Makarova V.V., Kulichikhin V.G., Gorbunova I.Y., Kerber M.L. Miscibility and rheological properties of epoxy resin blends with aromatic polyethers. *Vysokomolekulyarnye Soedineniya. Seriya A*. 2015;57(2):152–161 (in Russ.). <https://doi.org/10.1134/S2308112018050012>]
16. Guo Q., Zhu P., Li G., Huang L., Zhang Yu., Lu D., Sun R., Wong C.P. One-pot synthesis of bimodal silica nanospheres and their effects on the rheological and thermal-mechanical properties of silica-epoxy composites. *RSC Adv.* 2015;5(62):50073–50081. <https://doi.org/10.1039/C5RA06914A>

Об авторах

Полунин Степан Владимирович, к.х.н., доцент кафедры технологии переработки пластмасс, ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева» (125047, Россия, Москва, Миусская пл., д. 9). E-mail: mcnion@gmail.com. Scopus Author ID 57214461159, ResearcherID AGU-0493-2022, SPIN-код РИНЦ 8265-8155, <https://orcid.org/0000-0003-1732-9999>

Атамас Кирилл Андреевич, магистрант, ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева» (125047, Россия, Москва, Миусская пл., д. 9). E-mail: atamas.kirillandreich@yandex.ru. SPIN-код РИНЦ 9284-8979, <https://orcid.org/0009-0002-6266-1624>

Горбунова Ирина Юрьевна, д.х.н., профессор, заведующий кафедрой технологии переработки пластмасс, ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева» (125047, Россия, Москва, Миусская пл., д. 9). E-mail: giy161@yandex.ru. Scopus Author ID 7006042682, ResearcherID D-4732-2014, SPIN-код РИНЦ 6969-3346, <https://orcid.org/0000-0002-0390-9100>

Морозова Полина Алексеевна, магистрант, ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева» (125047, Россия, Москва, Миусская пл., д. 9). E-mail: polinaalex1999@gmail.com. Scopus Author ID 58560493900, SPIN-код РИНЦ 9859-2958, <https://orcid.org/0009-0003-0204-5667>

Марашовский Константин Маркович, к.т.н., заведующий лабораторией испытаний полимерного сырья и изделий из пластмасс, АО «Межотраслевой институт переработки пластмасс – НПО «Пластик» (121059, Россия, Москва, Бережковская набережная, д. 20, стр. 10). E-mail: kmara@npoplasic.ru. Scopus Author ID 57210255996, SPIN-код РИНЦ 8367-0770, <https://orcid.org/0009-0004-2210-7076>

About the authors

Stepan V. Polunin, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Department of Plastic Processing Technology, D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology (RSTU) (9, Miusskaya pl., Moscow, 125047, Russia). E-mail: mcnion@gmail.com. Scopus Author ID 57214461159, ResearcherID AGU-0493-2022, RSCI SPIN-code 8265-8155, <https://orcid.org/0000-0003-1732-9999>

Kirill A. Atamas, Master Student, D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology (RSTU) (9, Miusskaya pl., Moscow, 125047, Russia). E-mail: atamas.kirillandreich@yandex.ru. RSCI SPIN-code 9284-8979, <https://orcid.org/0009-0002-6266-1624>

Irina Yu. Gorbunova, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Head of the Department of Plastic Processing Technology, D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology (RSTU) (9, Miusskaya pl., Moscow, 125047, Russia). E-mail: giy161@yandex.ru. Scopus Author ID 7006042682, ResearcherID D-4732-2014, RSCI SPIN-code 6969-3346, <https://orcid.org/0000-0002-0390-9100>

Polina A. Morozova, Master Student, D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology (RSTU) (9, Miusskaya pl., Moscow, 125047, Russia). E-mail: polinaalex1999@gmail.com. Scopus Author ID 58560493900, RSCI SPIN-code 9859-2958, <https://orcid.org/0009-0003-0204-5667>

Konstantin M. Marakhovsky, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory for Testing Polymer Raw Materials and Plastic Products, Intersectoral Institute of Plastics Processing – NPO “Plastic” (20–10, Berezhkovskaya nab., Moscow, 121059, Russia). E-mail: kmara@npoplasic.ru. Scopus Author ID 57210255996, RSCI SPIN-code 8367-0770, <https://orcid.org/0009-0004-2210-7076>