



## КОНЦЕПЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ НОВОГО КЛАССА ГИБРИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО ДЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Алексей Геннадьевич Тусов<sup>1</sup>, Ананьев Максим Игоревич<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН», г. Якутск, Россия

<sup>1</sup> tuisovag@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5889-000>

<sup>2</sup> mi.ananiev@yandex.ru

**Аннотация.** В работе представлена концепция формирования нового класса гибридного эпоксид-полиэфирного связующего для полимерных композиционных материалов конструкционного назначения различных отраслей применения. Представленная концепция нового класса гибридных эпоксид-полиэфирных связующих предлагает инновационный путь преодоления традиционного компромисса между высокими механическими свойствами, технологичностью и стоимостью в производстве полимерных композитов. За счет создания сложной полимерной архитектуры, объединяющей жесткие эпоксидные и гибкие полиэфирные сегменты, можно получить матричный материал, превосходящий существующие аналоги по комплексному критерию «свойства-обработка-цена».

**Ключевые слова:** эпоксидное связующее, полиэфирное связующее, гибридное связующее, химическая модификация, взаимопроникающие сетки, физическое смешение, гибридное смешение

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования РФ «Разработка и исследование полимерных композиционных углеродсодержащих волокнистых материалов на основе винил-эфирно-эпоксидного полимерного связующего для климатических зон холодного климата и Арктики» (№ FWRS-2025-0027).

**Для цитирования:** Тусов А. Г., Ананьев М. И. Концепция формирования нового класса гибридного связующего для полимерных композиционных материалов // Ползуновский вестник. 2025. № 4, С. 194–196. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.033. EDN: <https://elibrary.ru/GDWAGW>.

---

Original article

## CONCEPT OF FORMING A NEW CLASS HYBRID BINDER FOR POLYMER COMPOSITE MATERIALS

Aleksei G. Tuisov<sup>1</sup>, Maksim I. Anan'ev<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, Russia

<sup>1</sup> tuisovag@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5889-000>

<sup>2</sup> mi.ananiev@yandex.ru

**Abstract.** The paper presents the concept of forming a new class of hybrid epoxy-polyester binders for polymer composite materials for various applications. The presented concept of a new class of combined epoxy-polyester binders offers an innovative way to overcome the traditional compromise between high mechanical properties, processability, and cost in the production of polymer composites. By creating a complex polymer architecture that combines rigid epoxy and flexible polyester segments, it is possible to obtain a matrix material that surpasses existing analogues in terms of the comprehensive "properties-processing-price" criterion.

**Keywords:** epoxy binder, polyester binder, hybrid binder, chemical modification, interpenetrating networks, physical mixing, hybrid mixing

**Acknowledgements:** The work was carried out as part of a state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation «Development and research of polymer composite carbon-containing fibrous materials based on a vinyl-ether-epoxy polymer binder for cold climate zones and the Arctic» (№ FWRS-2025-0027).

**For citation:** Tuisov, A. G. & Anan'ev, M.I (2025). Concept of forming a new class hybrid binder for polymer composite materials. Polzunovskiy vestnik, (4), 194-196. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.04.033. EDN: <https://elibrary.ru/GDWAGW>.

---

# КОНЦЕПЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ НОВОГО КЛАССА ГИБРИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО ДЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

## ВВЕДЕНИЕ

Современная промышленность предъявляет растущие требования к материалам, что стимулирует разработку полимерных композитов с расширенными функциональными возможностями [1,8]. Армированные полимерные композиты, сочетающие высокую прочность волокон с защитными и связующими свойствами матрицы, играют ключевую роль в таких отраслях, как авиация, ветроэнергетика, транспортное машиностроение и строительство. Однако существующие мономатричные системы, такие как классические эпоксидные или полиэфирные смолы, часто демонстрируют компромиссный характер свойств: достижение высокой механической прочности сопровождается снижением ударной вязкости и эластичности, а улучшение технологических параметров (например, скорости отверждения) может негативно сказаться на термической и химической стойкости.

Ответом на эти вызовы является стратегия создания гибридных или комбинированных связующих, которые объединяют преимущества различных полимерных семейств в рамках одной системы [2-7]. В статье изложены положения, которые легли в основу концепции разработки нового класса матричных материалов на основе синергетической комбинации эпоксидных и полиэфирных смол. Материаловедческая постановка задачи заключается не в простом физическом смешивании, а в создании интегрированной системы, где каждая компонента выполняет целенаправленную функцию, что позволяет получить связующее с уникальным комплексом свойств, превосходящим таковой у исходных материалов.

Эпоксидные смолы образуют матрицы с исключительной адгезией, высокой размерной стабильностью и выдающейся химической и термической стойкостью. Они являются стандартом для высоконагруженных конструкций в аэрокосмической отрасли. Однако их недостатки — хрупкость, ограниченная устойчивость к ударным и циклическим нагрузкам, а также относительно высокая стоимость и длительный цикл отверждения.

Полиэфирные смолы, в свою очередь, отличаются высокой технологичностью, быстрым отверждением при комнатной температуре, лучшей эластичностью и низкой стоимостью. Они доминируют в судостроении, производстве кузовых деталей и строительных конструкций. Их основные ограничения связаны со средними механическими показателями, высокой усадкой и меньшей долговременной стабильностью в агрессивных средах.

Таким образом, композиция, способная объединить прочность и стойкость эпоксидов с технологичностью, эластичностью и экономичностью полиэфиров, представляется крайне перспективной.

## КОНЦЕПЦИЯ И ПРОГНОЗИРУЕМЫЕ ЦЕЛЕВЫЕ СВОЙСТВА НОВОГО ГИБРИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО

Концепция нового связующего основывается на создании взаимопроникающих полимерных сеток (ВПС) (interpenetrating polymer networks - IPN) или фазово-сегрегированной системы, где эпоксидный и полиэфирный компоненты образуют взаимопроникающие, но химически или физически связанные фазы. Это позволяет не просто усреднить свойства, а получить синергетический эффект.

Ожидаемые целевые свойства нового класса

связующих [1-8]:

1. Механический профиль: Сохранение 80-90% прочности при растяжение и сдвиг по сравнению с чистым эпоксидным аналогом при кратном увеличении ударной вязкости и относительного удлинения (в 2-3 раза). Это достигается за счет введения гибких сегментов полиэфирной цепи, которые будут поглощать и диссилировать энергию.

2. Термические характеристики: Температура стеклования ( $T_g$ ) в диапазоне 100–150°C, что обеспечивает работоспособность в условиях повышенных тепловых нагрузок, характерных для многих промышленных применений, и превосходит возможности стандартных полиэфиров.

3. Технологические преимущества: Сокращение времени гелеобразования до 15–40 минут и значительное снижение экзотермического пика при отверждении по сравнению с полиэфирными системами. Это позволит формовать более крупные и толстостенные изделия без риска терморазрушения.

4. Адгезия и усадка: Сохранение превосходной адгезии эпоксидных смол к различным армирующим волокнам при снижении объемной усадки до 1–2% (против 5–12% у полиэфиров), что критически важно для обеспечения точности размеров и отсутствия внутренних напряжений.

5. Экономическая эффективность: Снижение себестоимости матрицы на 20–40% по сравнению с высокоэффективными эпоксидными системами за счет введения полиэфирного компонента.

Ожидается, что композиты на основе нового связующего продемонстрируют:

- Повышенную стойкость к усталости и циклическим нагрузкам за счет способности гибких сегментов релаксировать напряжения.

- Улучшенную технологичность при инфузионных и вакумно-мешковых методах формования благодаря регулируемой вязкости и увеличенному жизнеспособности состава.

- Хорошую ремонтопригодность вследствие более высокой химической активности поверхности.

Достижение целевых свойств возможно через несколько методологических подходов к комбинированию, представленных в таблице 1.

Наиболее перспективным представляется путь химической модификации, поскольку он обеспечивает максимально стабильную и воспроизводимую структуру материала. В качестве полиэфирного компонента целесообразно рассматривать полиэфирполиолы (например, на основе полипропиленгликоля или поликапролактона), которые можно эпоксидировать или ввести в реакцию с эпоксидными прекурсорами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Представленная концепция нового класса комбинированных эпоксид-полиэфирных связующих предлагает инновационный путь преодоления традиционного компромисса между высокими механическими свойствами, технологичностью и стоимостью в производстве полимерных композитов. За счет создания сложной полимерной архитектуры, объединяющей жесткие эпоксидные и гибкие полиэфирные сегменты, можно получить матричный материал, превосходящий существующие аналоги по комплексному критерию «свойства-обработка-цена».

Последующими шагами в развитии данной концепции должны стать:

1. Синтез и скрининг олигомерных систем с различным соотношением и строением компонентов.
2. Всестороннее исследование структуры (методами ДСК, ДМТА, электронной микроскопии) и свойств полученных связующих и композитов на их основе.
3. Оптимизация технологических параметров отверждения и формования.
4. Испытания в условиях, имитирующих реальную эксплуатацию (климатические камеры, воздействие химических сред, механическая усталость).

Успешная реализация данной концепции позволяет создать новый, конкурентоспособный класс материалов для широкого спектра отраслей — от транспорта и энергетики до строительства и спортивной индустрии, где требуются надежные, долговечные и технологичные композитные конструкции.

Таблица 1 - Подходы к созданию комбинированного эпоксид-полиэфирного связующего

Table 1 - Approaches to creating a combined epoxy-polyester binder

Подход	Описание	Ожидаемый эффект	Потенциальный состав (прогноз)
Физическое смешивание	Механическое смешивание готовых эпоксидного и полиэфирного олигомеров с их совместным отверждением.	Наиболее простой метод. Риск фазового расслоения. Умеренное улучшение ударной вязкости.	Эпоксид DGEBA (60%), Ненасыщенный полиэфир (40%), смешанный инициатор/отвердитель.
Химическая модификация	Введение в эпоксидную цепь гибких полиэфирных блоков на стадии синтеза смолы (эпоксид-полиэфирные блок-сополимеры).	Надежная химическая связь фаз. Оптимальный баланс прочности и ударной вязкости. Контроль морфологии.	Полиэфирполиол, реагирующий с эпихлоргидрином с образованием эпоксидированной олигомерной смолы.
Гибридное смешивание	Создание единой сетки, где полиэфирные звенья (например, на основе малеинового ангидрида) выступают как сшивющие агенты для эпоксидных групп.	Формирование плотной интерпенетрирующей сетки. Высокая жесткость и термостойкость.	Эпоксидная смола + полиэфир с концевыми карбоксильными/ангидридными группами + аминный отвердитель.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кочнев А.М., Галибеев С.С. Модификация структуры и свойств полимеров // Известия Вузов. Химия и химическая технология. 2003. Т. 46. № 4. С. 3–10.
2. M. Mohsin, et al. In-situ hybridization of an epoxy resin using polyurethane and MXene nanoplatelets for thermally stable nanocomposites with improved strength and toughness. *Polymer*, Volume 302, 16 May 2024, 127065. DOI: 10.1016/j.polymer.2024.127065.
3. Полунин С.В., Горбунова И.Ю., Кербер М.Л., Лукашов Н.И., Мжачих И.Е., Крючков И.А. Исследование свойств эпоксидных полимеров, модифицированных термопластами. *Пластичные массы*. 2022;(9-10):14-16. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2022-9-10-14-16>.
4. Морозова П.А., Горбунова И.Ю., Полунин С.В., Арутюнова А.М., Тукан Ю.В. Исследование свойств связующих на основе эпоксидированной смолы, модифицированной полиэфир-сульфоном. Успехи в химии и химической технологии, 2021, том 35, № 7, с. 44-46.
5. X.Q. Mi, N. Liang, H.F. Xu, J. Wu, Y. Jiang, B. Nie, et al., Toughness and its mechanisms in epoxy resins, *Prog. Mater. Sci.* 130 (2022).
6. V. K. Stokov, et al. A Review of Thermoplastic Resin Transfer Molding Process Modeling and Simulation. *Polymers*. 2019 Sep 24; 11(10):1555. DOI: 10.3390/polym11101555.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07 июня 2025; одобрена после рецензирования 24 ноября 2025; принята к публикации 28 ноября 2025.

The article was received by the editorial board on 07 June 2025; approved after editing on 24 Nov 2025; accepted for publication on 28 Nov 2025.