






Оценка химической стойкости эпоксидных покрытий с использованием критерия термодинамической совместимости

Никита И. Щегольков	¹	shegolkovnicita@ya.ru	 0009-0002-5422-4061
Людмила Ю. Комарова	¹	luknew@ya.ru	 0000-0003-3005-6411
Александр И. Цыбин	²	tsybin.a@tnzinc.ru	 0009-0008-0457-7460
Валерий Ю. Конохов	³	volkon_1@mail.ru	 0000-0002-6128-9413
Александр П. Кондратов	¹	apkrezerw@mail.ru	 0000-0001-6118-0808

¹ Московский политехнический университет, ул. Большая Семеновская, 38, Москва, 107023, Россия






² ООО «Техновацинк», ул. 2-я Энтузиастов, д.5, к.3, Москва, 111024, Россия

³ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Каширское ш., 31 г. Москва, 115409, Россия

Аннотация. Полимерные покрытия на основе эпоксидно-фенольных смол широко применяются для защиты углеродистой стали в нефтедобывающей и транспортной отраслях. Основной причиной потери адгезии и разрушения таких покрытий является диффузия агрессивных жидкостей через полимерную матрицу. Несмотря на подробную изученность сорбции воды терморезактивными полимерами, данные о термодинамической совместимости эпоксидно-фенольных материалов с органическими растворителями представлены недостаточно. В работе для количественной оценки совместимости использован критерий Флори-Хаггинса, позволяющий прогнозировать образование истинного раствора или гетерофазной дисперсии в системе полимер–жидкость. Объектами исследования служили свободные пленки толщиной 180 ± 25 мкм на основе эпоксидно-фенольной смолы, отвержденной тремя ароматическими полиамидами: на основе карданола, диэтилтолуолдиамин и метилен-бис(орто-этиланилин). Кинетику сорбции в дистиллированной воде и о-ксилоле изучали гравиметрическим методом, изменение термомеханических свойств оценивали методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Установлено, что максимальная степень набухания в воде убывает в ряду: отвердитель на основе карданола > диэтилтолуолдиамин > метилен-бис(орто-этиланилин), тогда как в о-ксилоле последовательность меняется: карданольный отвердитель > метилен-бис(орто-этиланилин). Рассчитанные значения критерия Флори-Хаггинса свидетельствуют, что термодинамическая совместимость напрямую зависит от наличия полярных групп в структуре отвердителя. Наибольшая сорбция воды и о-ксилола зафиксирована для полимера с сшивающим агентом на основе карданола, что объясняется присутствием гидроксильной группы и длинного алифатического фрагмента. Методом ДСК установлено, что температура стеклования для полимера на основе диэтилтолуолдиамина после экспозиции в агрессивных средах не претерпела существенных изменений.

Ключевые слова: эпоксидно-фенольная смола, полиаминный отвердитель, сорбция, термодинамическая совместимость, химическая стойкость.

Assessment of Chemical Resistance of Epoxy Coatings Using the Criterion of Thermodynamic Compatibility

Nikita I. Shchegolkov	¹	shegolkovnicita@ya.ru	 0009-0002-5422-4061
Lyudmila Yu. Komarova	¹	luknew@ya.ru	 0000-0003-3005-6411
Alexander I. Tsybin	²	tsybin.a@tnzinc.ru	 0009-0008-0457-7460
Valery Y. Konyukhov	³	volkon_1@mail.ru	 0000-0002-6128-9413
Alexander P. Kondratov	¹	apkrezerw@mail.ru	 0000-0001-6118-0808

¹ Moscow Polytechnic University, st. Bolesnaya Semenovskaja, 38, Moscow, 107023, Russia

² LLC "Technovatsink". 2-ya Entuziastov St., Bld. 5, Unit 3, Moscow, 111024, Russia

³ National Research Nuclear University "MEPhI", 31 Kashirskoe Shosse, Moscow, 115409, Russia

Abstract. Epoxy-phenolic polymer coatings are widely used for the corrosion protection of carbon steel in the oil production and transportation industries. A primary cause of adhesion loss and coating degradation is the diffusion of aggressive liquids through the polymer matrix. While water sorption by thermosetting polymers has been extensively studied, data on the thermodynamic compatibility of epoxy-phenolic materials with organic solvents remain limited. In this work, the Flory–Huggins interaction parameter (χ) was employed to quantitatively assess compatibility and to predict whether a true solution or a heterogeneous dispersion forms in the polymer–liquid system. Free-standing films with a thickness of 180 ± 25 μm were prepared from an epoxy-phenolic resin cured with three aromatic polyamines: a cardanol-based hardener, diethyltoluenediamine, and methylene-bis(ortho-ethylaniline). Sorption kinetics in distilled water and o-xylene were studied gravimetrically, while changes in thermomechanical properties were evaluated by differential scanning calorimetry (DSC). It was established that the maximum degree of swelling in water decreases in the order: cardanol-based hardener > diethyltoluenediamine > methylene-bis(ortho-ethylaniline), whereas in o-xylene the sequence changes to: cardanol-based hardener > methylene-bis(ortho-ethylaniline) > diethyltoluenediamine. The calculated Flory–Huggins parameters indicate that thermodynamic compatibility is directly governed by the presence of polar groups within the hardener structure. The highest sorption of both water and o-xylene was recorded for the polymer crosslinked with the cardanol-based agent, which is attributed to the presence of hydroxyl groups and a long aliphatic segment. DSC analysis revealed that the glass transition temperature of the polymer based on diethyltoluenediamine did not undergo significant changes following exposure to the aggressive liquid media.

Keywords: epoxy-phenolic resin, polyamine hardener, sorption, thermodynamic compatibility, chemical resistance.

Для цитирования

Щегольков Н.И., Комарова Л.Ю., Цыбин А.И., Конохов В.Ю., Кондратов А.П. Оценка химической стойкости эпоксидных покрытий с использованием критерия термодинамической совместимости // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 2. С. 352–363. doi:10.20914/2310-1202-2026-2-352-363

For citation

Shchegolkov N.I., Komarova L.Yu., Tsybin A.I., Konyukhov V.Y., Kondratov A.P. Assessment of Chemical Resistance of Epoxy Coatings Using the Criterion of Thermodynamic Compatibility. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 2. pp. 352–363. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-2-352-363

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Композиционные материалы, в структуру которых входит полимерный слой на основе эпоксидных или эпоксидно-фенольных смол, зарекомендовали себя как проверенное решение для продления срока эксплуатации инженерно-техническим конструкциям в нефтедобывающей, судоходной и транспортной промышленности [1, 2].

В то же время, ужесточаются требования к функциональным качествам покрытий, в частности, к барьерным свойствам и химической устойчивости. Применительно к нефтедобывающей отрасли, такая тенденция обусловлена увеличением степени разработанности нефтяных месторождений, что в свою очередь приводит к повышенному содержанию воды и коррозионно-активных газов в добываемом флюиде.

Органические полимеры широко используются для защиты металлов от коррозии, но их отслоение является существенной проблемой, особенно вызываемое диффузией воды через полимерную матрицу. Наряду с фундаментальными вопросами о водородных связях и свободной энергии, диффузионные процессы представляют интерес для большого числа исследователей [3–5].

Сорбция воды полимером приводит к деградации материала – набуханию, пластификации, гидролизу, изменению температуры стеклования и формированию областей разрушения композиционного изделия (рисунок 1).

Выделяют два фактора водопоглощения высокосшитой полимерной матрицы – это полярность цепи, которая характеризуется количеством гидроксильных групп, и свободный объем между полимерными цепями.

Диффузия влаги в эпоксидных композициях, погруженных в воду, достаточно подробно описана [6–7], а влияние этого процесса на механические свойства систематически исследовалось в работах [8–13].

В [14] с использованием термодинамического подхода, основанного на определении химического потенциала воды, произведено построение математической модели процесса сорбции в условиях механического нагружения полимерного изделия. Модель учитывает изменение плотности полимера в процессе диффузии и его максимальную способность поглощения влаги. Разработанный подход применяется к случаям одновременного действия влаги и механической нагрузки под внешним давлением.

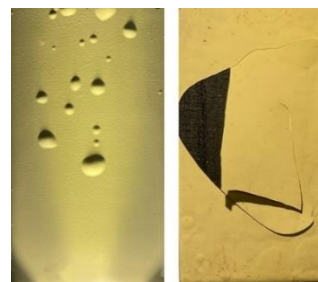


Рисунок 1. Разрушение эпоксидно-фенольного покрытия на стали в жидкой среде

Figure 1. Degradation of an epoxy-phenolic coating on steel in a liquid medium

В работе [15] предложена модель, связывающая приложенные напряжения и способность к поглощению для неармированного полимера. Основанная на стандартных термодинамических принципах, модель подтверждает тенденцию: наличие напряжения сжатия уменьшает количество поглощаемой воды.

Помимо использования различных моделей при изучении сорбции жидкости полимером, проводились работы по модификации химического состава композиции.

В работе [16] эпоксидный полимер, отвержденный циклоалифатическим аминным отвердителем, экспонировали в течение 3, 6, 9 и 12 месяцев на открытом стенде в условиях умеренно-теплого морского климата. В композицию вводили алифатический трехфункциональный разбавитель в количестве 10 % и 25 % по массе. Оценивалось влияние добавки на предельное влагосодержание при увлажнении и последующей десорбции. Для обоих составов, чистого эпоксидного связующего и его композиции с добавлением 10% разбавителя, разность равновесных влажностей в условиях водонасыщения и высушивания оставалась стабильной на протяжении 12 месяцев экспозиции и составляла 2,0–2,5%. При увлажнении полимера с содержанием 25% разбавителя увеличение массы образцов за счет сорбции влаги существенно компенсируется потерей массы из-за десорбции продуктов гидролиза.

Авторы исследования [17] на основе трех различных эпоксидных смол разной структуры и функциональности синтезировали нанокомпозиты с использованием смектитовой глины, модифицированной октадециламмонием. Методом гравиметрических измерений были определены свойства водопоглощения для серии каждой нанокомпозитной системы с различной концентрацией органо-глины. Степень влагопоглощения с добавлением наносмектитовой глины уменьшилась на 0,2–0,5%.

Наиболее распространенными отвердителями для эпоксидных смол являются амины различных типов: алифатические, ароматические и циклоалифатические. Тип, количество и функциональность сшивающего агента, а также условия полимеризации влияют на свойства готового изделия.

Было выявлено, что использование ароматического отвердителя, по типу мета-ксилендиамина, позволяет получить высокую адгезионную прочность контакта полимер-бетон. Использование алифатического отвердителя привело к меньшим значениям адгезии. В тоже время, полимерные композиции с содержанием алифатических отвердителей демонстрируют большую прочность на изгиб и сжатие, в сравнении с ароматическими сшивающими агентами, что говорит о важности функциональности аминного соединения для достижения оптимальных механических характеристик готового изделия [18].

Влияние типа полиаминного отвердителя на степень поглощения влаги эпоксидным материалом изучалось в работе [19]. С помощью гравиметрического метода были зафиксированы следующие значения набухания полимера: циклоалифатический 0,16%, ароматический 1,7%, алифатический 2%.

Эти данные по влагонасыщению подтверждаются исследованием [20]. Для отверждения диановой эпоксидной смолы применяли ароматический м-ксилилендиамин и алифатический триэтилентетрамин. Сформированная м-ксилилендиамином полимерная матрица продемонстрировала меньшую степень набухания.

В работе [21] способность полимерного материала сорбировать воду исследовалась гравиметрическим способом с использованием широкополосной диэлектрической спектроскопии, динамического механического термического анализа и измерений толщины. Авторы исследования полимеризовали эпоксидную смолу двумя различными классами отвердителей: дициандиамином и амином. Полимерный слой с дициандиамином имеет меньшую долю боковых гидроксильных групп по сравнению с материалом, отвержденным амином, и демонстрирует меньший коэффициент диффузии: $1,69 \times 10^{-13} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ и $2,62 \times 10^{-12} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ соответственно.

Проводились работы в области определения влияния стехиометрического соотношения эпоксидная смола / аминный отвердитель [22–24] и времени отверждения [25–26] на свойства полимерного материала.

Исследователи пришли к выводу, что составы, обладающие увеличенным содержанием эпоксидных групп и дефицитом групп – OH, то есть при низком соотношении эпоксид / амин, поглощают меньше влаги [22, 24]. При увеличении содержания амина, от стандартного стехиометрического значения, влагопоглощение увеличивается.

В то же время состав с пониженным содержанием амина приобретает сниженную температуру стеклования и утрачивает механические свойства [23].

Сорбция воды эпоксидным полимером также коррелирует со свободным объемом в структуре материала, который определяется плотностью сшивки.

В ряде научных работ продемонстрировано, что чем выше степень отверждения, тем больше величина свободного объема и степень водопоглощения полимерного материала. При этом изменение полярности структуры, определенной оценкой краевого угла смачивания, не наблюдается [25–26].

При анализе литературы выявлен недостаток данных, направленных на расчет термодинамической совместимости агрессивных растворителей и полимерного материала на основе эпоксидных или эпоксидно-фенольных смол.

Помимо этого, сорбция воды терморезистивными полимерами подробно изучена, но данные о взаимодействии с органическими растворителями, в частности с производными аренов, остаются фрагментарными. В качестве ароматического углеводорода выбран о-ксилол как второй вариант агрессивной среды при исследовании термодинамической совместимости с эпоксидной матрицей. Он широко распространен как компонент промышленных растворителей и нефтепродуктов, что обуславливает практическую необходимость оценки стойкости покрытий к его воздействию. Также о-ксилол является неполярным растворителем, принципиально отличаясь от воды, что позволяет сравнить вклад различных механизмов межмолекулярных взаимодействий в термодинамическую совместимость с полимерной матрицей различной химической структуры.

Авторы настоящего исследования пришли к решению использовать Критерий Флори-Хаггинса (χ), который позволяет оценить термодинамическую совместимость полимера и растворителя, определяя, будет ли образовываться истинный раствор при их совмещении или система останется двухфазной дисперсией.

Поэтому представляет несомненный интерес исследование влияния коммерческих марок ароматических полиаминных отвердителей на процесс сорбции эпоксидно-фенольных полимерных материалов различной структуры.

Процесс поглощения жидкости полимерами, определяемый по критерию Флори–Хаггинса, может иметь два термодинамических состояния: $\chi < 0,5$ – растворитель термодинамически хороший и полимер способен неограниченно набухать; $\chi > 0,5$ – растворитель плохой, полимер не набухает или сорбируется медленно и в ничтожных количествах.

Формулу расчета критерия Флори–Хаггинса χ возможно вывести из формулы Флори–Ренера [27]. В таком случае она приобретает следующий вид:

$$\chi = \frac{-\ln(1 - \Phi_E) + \Phi_E + Z^1 \Phi_E^{\frac{1}{3}}}{\Phi_E^2} \quad (1)$$

где Φ_E – значение объемной доли полимера в его равновесном состоянии, учитывающее исходный и конечный объем исследуемого объекта; Z – безразмерный параметр, равный отношению молярного объема субцепей полимера V_2 к молярному объему растворителя V_1 .

$$V_2 = RTE^1 \Phi_E^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

где R – универсальная газовая постоянная; E – модуль упругости набухшего полимера, МПа.

Материалы и методы

Лакокрасочный материал, используемый для антикоррозионной защиты стали, представляет собой пигментированную низковязкую эпоксидно-фенольную смолу.

Данный вид смолы является продуктом конденсации фенолформальдегидных смол с различной молекулярной массой и эпихлоргидрина, в результате которой образуются полифункциональные (содержащие более двух эпокси-групп в молекуле) эпоксидные соединения, которые обеспечивают, в условиях высокотемпературного отверждения, получение прочных материалов с тепло- и химической стойкостью.

Для полимеризации смолы и формирования трехмерной сшитой матрицы применялись следующие коммерческие марки промышленных ароматических диаминных отвердителей: NX, RLC и MOEA. Техническая чистота этих соединений составляет 85–90%.

Информация об отвердителях представлена в таблице 1.

Структурные формулы смолы и отвердителей представлены на рисунке 2.

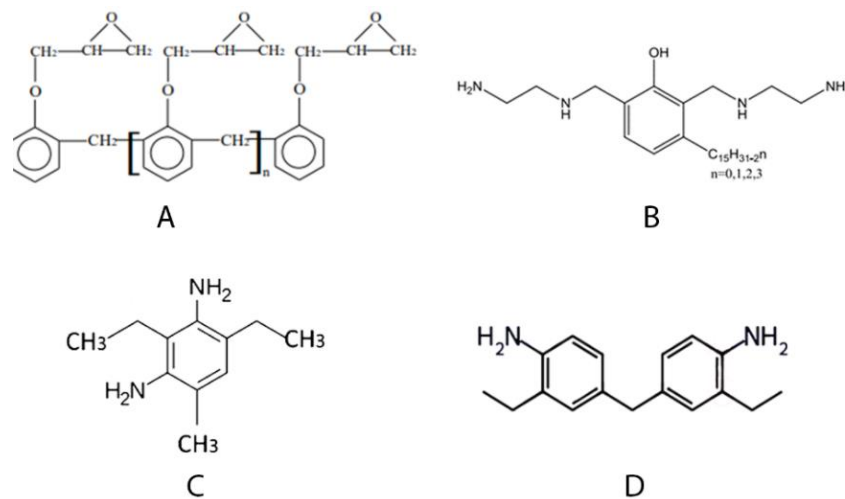


Рисунок 2. Структурные формулы: А – эпоксидно-фенольной смолы; В – отвердителя NX; С – отвердителя RLC; D – отвердителя MOEA

Figure 2. Structural formulas: A – epoxy-phenolic resin; B – NX curing agent; C – RLC curing agent; D – MOEA curing agent

Отвердитель NX представляет собой сшивающий агент на основе карданола. Подобная группа отвердителей именуется как фенолкамины, представляющие собой продукт реакции фенольных соединений, формальдегида и аминов. Характеризуется наличием длинной алифатической цепи C_{15} в мета положении [28].

Отвердитель RLC, аналог коммерческого отвердителя DEDTA – диэтилтолуолдиамин с формулой $C_{11}H_{18}N_2$. Распространенный вид полиаминного отвердителя в промышленности.

Отвердитель MOEA – метилен-бис(орто-этиланилин) $C_{17}H_{22}N_2$, представляющий собой диамин с двумя бензольными кольцами.

Для изучения термодинамической совместимости эпоксидного полимера и жидкостей были изготовлены образцы полимерных слоев в виде свободных пленок, не связанных адгезионными связями с металлической подложкой, размерами: 50×30 мм для фиксации изменения массы и объема материала в процессе сорбции, а также 10×80 мм для набухания и дальнейшего испытания на растяжение. Толщина полимерного слоя для обоих видов образцов составила 180 ± 25 мкм.

Таблица 1.

Характеристики ароматических полиаминных отвердителей для эпоксидно-фенольных смол

Table 1.
Characteristics of Aromatic Polyamine Hardeners for Epoxy-Phenolic Resins

Отвердитель Hardener	Соотношение смола/ отвердитель Resin/hardener ratio	Аминное число, мг КОН/г Amine value, mg KOH/g	Вязкость при 25 °С, Па×с Viscosity at 25 °С, Pa×s
NX	100/13,7	350	0,9
RLC	100/6,4	620	0,3
МОЕА	100/9	590	5

Изготовление свободных пленок происходило путем распыления безвоздушным методом гомогенизированной двухкомпонентной смеси смола-отвердитель на антиадгезионную силиконизированную бумагу плотностью 80 г/м².

Безвоздушное распыление – это метод нанесения низковязких полимерных материалов, при котором состав диспергируется в аэрозоль за счет центробежных сил во вращающейся камере распылителя. Привод камеры осуществляется от пневмотурбины, использующей энергию сжатого воздуха.

После нанесения полимерного слоя на антиадгезионную подложку, образцы размещались в сушильном шкафу.

Температурный режим и время полимеризации определялись структурой отвердителя. Для состава с NX выбран следующий регламент: первая ступень нагрева 90 ± 3 °С в течение 30 минут, вторая ступень 170 ± 3 °С в течение 80 минут. При полимеризации композиций с RLC и МОЕА использовался следующий протокол: первая ступень нагрева 110 ± 3 °С в течение 30 минут, вторая ступень 130 ± 3 °С в течение 30 минут, далее третья ступень 180 ± 3 °С в течение 120 минут

После процесса отверждения слой эпоксидного полимера свободно отделялся от антиадгезионной бумаги.

Количественная оценка сорбционной агрессивности жидкостей по отношению к полимерным материалам проводилась гравиметрическим методом, путем размещения свободных пленок эпоксидной смолы, сшитой различными полиаминными отвердителями, в дистиллированную воду и химически чистый о-ксилол. Выдержка в жидкостях экспериментальных образцов производилась в сушильном шкафу при температуре 24 ± 3 °С. Длительность испытания составила 216 часов в воде и 264 часа в о-ксилоле до установления равновесного состояния.

Взвешивание образцов полимерного материала, до и после набухания через заданные промежутки времени, производилось на аналитических весах с точностью до $\pm 0,001$ г. Образцы пленок, при извлечении из жидкости, обмакивали фильтровальной бумагой для удаления излишков сорбата.

Степень набухания определялась по:

$$H = (m_{\tau} - m_0)100\% / m_0, \quad (3)$$

где m_0 – масса свободной пленки до процесса поглощения жидкости, г; m_{τ} – масса свободной пленки после процесса поглощения жидкости в течении времени τ , г.

Объем полимерного материала до и после сорбции определялся с помощью измерения толщины свободной пленки электромагнитным толщиномером.

Оценка модуля упругости производилось путем растяжения образца полимерной пленки на лабораторной разрывной машине. Для каждой марки отвердителя было испытано по 3 образца в исходном состоянии и после сорбции в агрессивной жидкости.

Использовалась дифференциально сканирующая калориметрия для определения влияния процесса набухания эпоксидно-фенольного полимера на его температуру стеклования (T_g).

Результаты и обсуждение

Кинетика набухания эпоксидно-фенольного полимера, сшитого различными полиаминными отвердителями, в воде и о-ксилоле представлена на рисунках 3 и 4 соответственно.

Предельное водопоглощение H после 216 часов испытания убывает в ряду отвердителей NX, RLC, МОЕА. Наибольший прирост массы в 1,04% зафиксирован у композиции с отвердителем NX. Для трех вариаций полимерных композиций ориентировочное время перехода в равновесное состояние составляет 72 часа.

При набухании в о-ксилоле полимерные системы на основе RLC и MOEA демонстрируют сопоставимое увеличение массы, наблюдаемое при сорбции в воде. В то же время, для композиции с NX наблюдается насыщение в 3,99%, что в среднем больше в 8,8 раз сравнительно с двумя другими рассматриваемыми отвердителями.

Относительно большее насыщение агрессивными жидкостями эпокси-фенольной матрицей, отвержденной соединением NX, можно объяснить разветвленной структурой отвердителя за счет наличия длинного алифатического

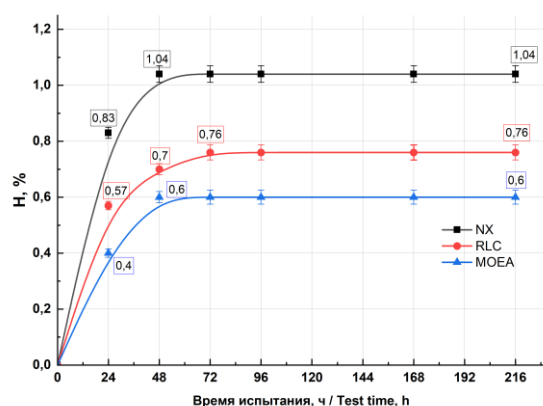


Рисунок 3. Кинетика набухания эпокси-фенольного полимера, сшитого различными полиаминными отвердителями, в воде

Figure 3. Swelling Kinetics of an Epoxy-Phenolic Polymer Crosslinked with Various Polyamine Hardeners in Water

Авторы настоящего исследования допускают вероятность того, что при сорбции полимерных композиций на основе RLC и MOEA происходит заполнение поверхностных пор и неровностей материала без взаимодействия со структурой полимера. Такое предположение следует из кинетики набухания в рассматриваемых растворителях, обладающих различной природой. Данную версию возможно проверить проведением испытания на десорбцию и повторной сорбцией.

На рисунках 5 и 6 приведены зависимости степени набухания эпокси-фенольного полимера в дистиллированной воде и о-ксилоле от времени в линейных координатах уравнения кинетики первого порядка для определения константы скорости набухания.

Константу скорости набухания k возможно получить из уравнения:

$$\ln\left(\frac{\alpha_{\infty}}{\alpha_{\infty} - \alpha_t}\right) = kt \quad (4)$$

где α_t – степень набухания полимерного материала, равная отношению массы, сорбированной за время t жидкости, к исходной массе образца;

отрезка C_{15} . Как следствие, увеличивается свободный объем, который занимает жидкая среда. В случае набухания в орто-ксилоле, сродство растворителя и сорбента приводит к большему увеличению массы, так как агрессивному соединению проще встроиться в структуру материала.

Отвердители RLC и MOEA формируют с эпокси-фенольной смолой более плотную и компактную структуру, благодаря чему наблюдается меньшая степень набухания. Учитывая допустимый интервал, можно говорить об идентичной устойчивости этих отвердителей к о-ксилолу.

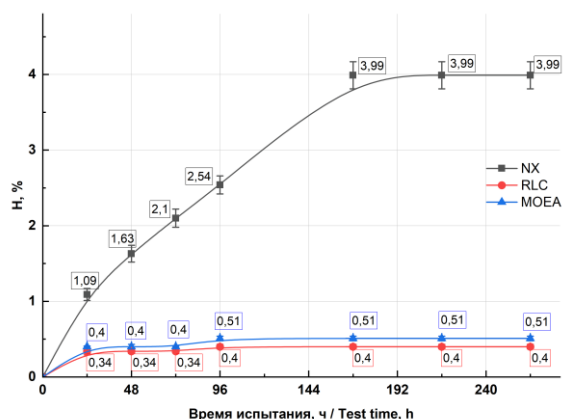


Рисунок 4. Кинетика набухания эпокси-фенольного полимера, сшитого различными полиаминными отвердителями, в о-ксилоле

Figure 4. Swelling Kinetics of an Epoxy-Phenolic Polymer Crosslinked with Various Polyamine Hardeners in o-Xylene

α_{∞} – максимальная степень набухания предельно набухшего образца, равная отношению максимальной массы сорбированной жидкости к исходной массе образца.

Тангенс угла наклонной прямой в данных координатах будет соответствовать константе скорости набухания k , $ч^{-1}$.

Константы скорости набухания полимерных пленок в воде убывают в следующем ряду: NX, RLC, MOEA и составляют $0,067 ч^{-1}$, $0,058 ч^{-1}$, $0,046 ч^{-1}$ соответственно. Подобные значения демонстрируют, что материал на основе NX обладает наибольшей скоростью набухания в противовес соединению с MOEA. Отвердитель RLC занимает промежуточное значение.

Значения констант скорости набухания в о-ксилоле составили $0,011 ч^{-1}$ для NX, $0,064 ч^{-1}$ для RLC и $0,074 ч^{-1}$ для MOEA. Сравнительно низкое значение константы скорости для материала на основе NX отражает медленное начало сорбции, но материал достигает наибольшего значения насыщения жидкостью, что может свидетельствовать о большей емкости материала, несмотря на медленную кинетику. Константы

для RLC и MOEA коррелируют с быстрым начальным ростом массы, но ограниченным набуханием в среде о-ксилола.

В таблице 2 приведены прирост толщины пленок после сорбции в агрессивных жидкостях и объемная доля полимерного материала в его равновесном состоянии Φ_E , характеризующие отношение исходного и конечного объема материала. Изменение площади образцов при проведении испытания не наблюдалось.

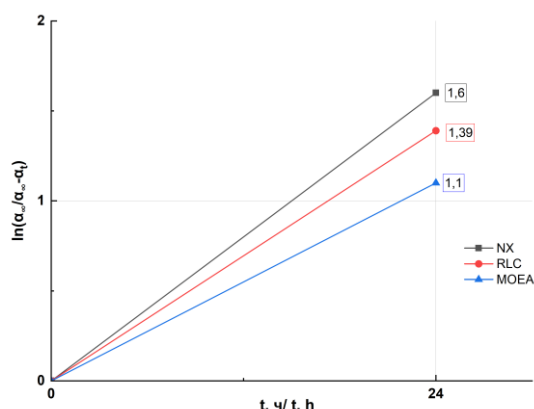


Рисунок 5. Зависимость степени набухания эпокси-фенольного полимера, сшитого различными полиаминными отвердителями, в воде от времени в линейных координатах уравнения кинетики первого порядка

Figure 5. Dependence of the swelling degree of an epoxy-phenolic polymer crosslinked with various polyamine curing agents in water on time in the linear coordinates of the first-order kinetics equation

Результаты определения исходного и конечного объема пленок эпокси-фенольного полимера подтверждаются кинетикой набухания. Для композиции на основе NX зафиксирован наибольший прирост объема в обоих растворителях. Наименьший прирост толщины демонстрируют композиции с полиаминным отвердителем RLC при сорбции в о-ксилоле и с MOEA при набухании в воде.

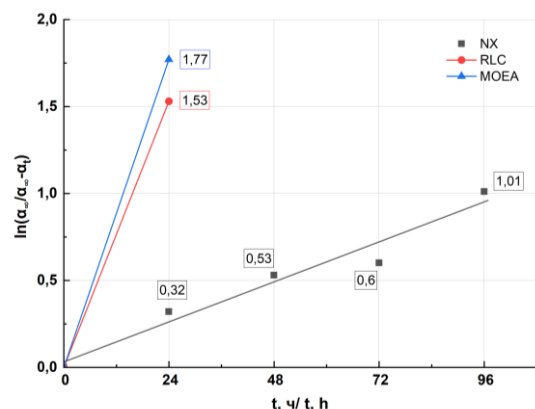


Рисунок 6. Зависимость степени набухания эпокси-фенольного полимера, сшитого различными полиаминными отвердителями, в о-ксилоле от времени в линейных координатах уравнения кинетики первого порядка

Figure 6. Dependence of the swelling degree of an epoxy-phenolic polymer crosslinked with various polyamine curing agents in o-Xylene on time in the linear coordinates of the first-order kinetics equation

Таблица 2.

Изменение толщины свободных пленок и значение объемной доли полимерного материала

Table 2.

Change in thickness of free films, volume fraction of the polymeric material

Отвердитель Hardener	Вода	Water	О-ксилол	o-Xylene
	Δh , мкм μm	Φ_E	Δh , мкм μm	Φ_E
NX	6	0,971	22	0,901
RLC	4	0,98	2	0,99
MOEA	2	0,99	6	0,971

Результаты испытаний на растяжение полимерных слоев, степень набухания и критерий Флори–Хаггинса представлены в таблице 3.

Эпокси-фенольный полимер, отвержденный соединением NX, обладает наибольшим пределом прочности при растяжении и модулем Юнга в исходном состоянии, что характеризует его как сравнительно жесткий материал, устойчивый к растяжению.

Системы с отвердителем RLC и MOEA демонстрируют сопоставимые результаты после испытания на растяжения, модуль Юнга в исходном состоянии 850 МПа и 512 МПа соответственно.

После сорбции в воде, для систем с отверждающими агентами NX и RLC, наблюдается увеличение относительного удлинения в ~ 2,7 раза, что свидетельствует о пластификации полимерной матрицы. Для отвердителя MOEA подобной тенденции не обнаружено.

Отмечено, что для трёх рассматриваемых видов полимерных систем после набухания в воде предел прочности и модуль Юнга не претерпевает значительных изменений, за исключением композиции с NX, для которой зафиксировано снижение модуля Юнга на 14,2%.

После набухания полимерных композиций в о-ксилоле заметное увеличение предела прочности на 82,5% демонстрирует материал с отвердителем MOEA. Существенного изменения этого параметра для NX и RLC не наблюдается.

Рост относительного удлинения после выдержки к о-ксилолу характерен для полимера с NX и RLC: с 2,6 до 5,3% и с 2,2 до 2,5% соответственно. Для отвердителя МОЕА отмечено снижение на 27,9%.

Модуль Юнга для рассматриваемых полимерных композиций, после установления равновесия в о-ксилоле, претерпевает следующие изменения: снижение этого показателя для

NX и RLC на 39 и 13% соответственно, в то время как для системы с МОЕА наблюдается увеличение модуля упругости на 83,8%.

После растяжения свободных пленок эпоксидно-фенольного полимера в состоянии максимальной сорбции был определен модуль Юнга и рассчитан критерий Флори-Хаггинса (χ) по формуле (1), проведен сравнительный анализ полученных значений.

Таблица 3.

Результаты испытаний на растяжение, предельная степень набухания и критерий Флори-Хаггинса эпоксидно-фенольных полимеров

Table 3.

Tensile test results, equilibrium swelling ratio, and Flory–Huggins parameter of epoxy–phenolic polymers

Отвердитель Hardener	Степень набухания H, % Swelling degree H, %	Предел прочности σ , МПа Tensile strength σ , MPa	Относительное удлинение ϵ , % Tensile elongation ϵ , %	Модуль Юнга E, МПа Young's module E, MPa	Критерий Флори- Хаггинса χ Flory-Huggins criterion
Исходный образец Initial sample					
NX		18,3	2,6	2658	
RLC		10,3	2,2	850	
МОЕА		10,3	4,3	512	
Вода Water					
NX	1,04	20,7	6,3	2327	2,5
RLC	0,76	8,3	6,3	830	2,9
МОЕА	0,6	10,8	4,2	540	3,6
О-ксилол o-Xylene					
NX	3,9	20,8	5,3	1620	0,8
RLC	0,4	7,4	2,5	740	3,3
МОЕА	0,51	18,8	3,1	941	2,2

Из таблицы 3 следует, что из представленного ряда эпоксидно-фенольных полимеров наиболее подвержен набуханию как в воде, так и в о-ксилоле полимер на базе NX (для него наблюдали наибольшие степени набухания и наименьший в ряду критерий Флори-Хаггинса). Другие исследуемые полимеры в разной степени взаимодействуют с водой и о-ксилолом в зависимости от строения отвердителя. Так, полимер с RLC более термодинамически совместим с водой (большие H и меньшие значения χ), чем с о-ксилолом. И наоборот, полимер на базе МОЕА интенсивнее взаимодействует с о-ксилолом, чем с водой. Указанные закономерности обусловлены наличием полярных групп в молекуле отвердителей. Так, отвердитель NX помимо слабополярных групп NH_2 , присутствующих во всех соединениях, содержит в своем составе сильнополярную группу OH (см. рисунок 2 В). Это обстоятельство обуславливает лучшее в ряду набухание в воде системы на базе NX.

С точки зрения наличия слабополярных групп NH_2 полимеры на базе RLC и МОЕА (рисунок 2 С и D) практически равноценны,

но наличие большего числа ароматических колец в структуре D делает его более восприимчивым к о-ксилолу, чем система с RLC.

Следует отметить аномальное возрастание предела прочности с 10,3 до 18,8 МПа и модуля Юнга с 512 до 941 МПа для эпоксидно-фенольного полимера на основе отвердителя МОЕА после экспозиции в о-ксилоле, тогда как значения для систем на основе NX и RLC не наблюдается существенных изменений. Подобное упрочнение, сопровождающееся падением относительного удлинения, свидетельствует не о пластификации, а об увеличении жесткости структуры. Вероятно, это связано со специфическим взаимодействием неполярного ароматического о-ксилола с жесткими ароматическими звеньями полимера на базе МОЕА, инициирующее увеличение плотности упаковки макромолекул.

Термограммы дифференциально сканирующей калориметрии, на которых отображено влияние сорбции в дистиллированной воде эпоксидно-фенольного полимера с отвердителем RLC на температуру стеклования, представлена на рисунке 7.

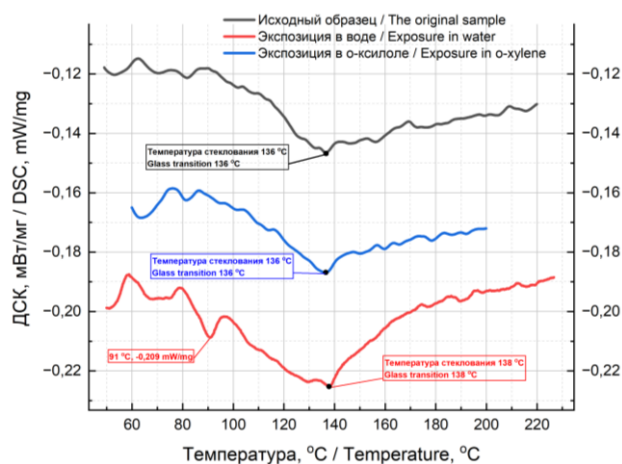


Рисунок 7. Термограммы ДСК эпоксидно-фенольного полимера, сшитого отвердителем RLC, в исходном состоянии, после экспозиции в воде и о-ксилоле.

Figure 7. DSC thermograms of the epoxy-phenolic polymer crosslinked with RLC hardener in the initial state, after exposure to water and o-xylene

При анализе термограмм обнаружено, что температура стеклования эпоксидно-фенольного полимера (T_g 136 °C) существенно не изменилась после экспозиции материала при 24 °C в воде (T_g 138 °C) и о-ксилоле (T_g 136 °C), что обусловлено высокой плотностью сшивки матрицы и коррелирует с кинетикой набухания в обеих жидкостях.

Эндотермический эффект при 91° C на термограмме образца после набухания в воде указывает на удаление влаги из свободного объема матрицы.

Заключение

Исследована кинетика и термодинамика набухания в воде и о-ксилоле эпоксидно-фенольного полимера, сшитого различными отвердителями. Установлено, что максимальная степень набухания полимеров в воде последовательно убывает в ряду ароматических полиаминных отвердителей: NX, RLC, MOEA, а степень набухания в о-ксилоле убывает в ином порядке: NX, MOEA, RLC.

Установленные закономерности скорости сорбции и набухания соотнесены с составом и химической структурой эпоксидно-фенольного полимера, с наличием и количеством полярных OH и слабополярных NH₂ групп в их макромолекулах. Отвердитель NX вносит полярную группу OH в макромолекулу эпоксидно-фенольного полимера и обеспечивает наибольшее набухание в воде. Наличие большего числа

ароматических колец в структуре отвердителя MOEA делает полимер на его основе менее стойким к о-ксилолу, по сравнению с эпоксидно-фенольным полимером, содержащим отвердитель RLC.

По экспериментальным оценкам набухания и модуля Юнга эпоксидно-фенольного полимера в контакте с жидкостями вычислены значения критерия термодинамической совместимости Флори-Хаггинса в системах «полимер – вода» и «полимер – о-ксилол». Все исследованные жидкости являются «плохими» растворителями с позиции термодинамической совместимости, но обладают различным влиянием на химическую стойкость эпоксидно-фенольного полимера, сшитого различными отвердителями в ненапряженном состоянии. Целесообразно продолжить изучение химической стойкости покрытий из эпоксидно-фенольных полимеров на металлических деталях испытывающих механические нагрузки с учетом внутренних механических напряжений, возникающих в полимерах при отверждении смолы.

Методом дифференциально сканирующей калориметрии установлено, что температура стеклования исходного образца с сшивающим агентом RLC не претерпела значительных изменений после экспозиции при 24 °C в обеих жидкостях. Полученные данные свидетельствуют о химической стойкости материала, что обусловлено высокой плотностью сшивки полимерной матрицы.

Литература

- 1 Студеникина Л.Н., Домарева С.Ю., Голенских Ю.Е., Матвеева А.В. Особенности высоконаполненных композитов на основе различных марок поливинилового спирта // Вестник ВГУИТ. 2021. Т. 83. № 1. С. 316–322. doi: 10.20914/2310-1202-2021-1-316-322
- 2 Kouser T., Nur F., Aliyu A., Altaf F. et al. Applications of epoxy resins as a coating technology in fluid systems // ChemBioEng. 2025. V. 12. № 2. P. e70000. doi: 10.1002/cben.70000

- 3 Xian G., Niu Y., Qi X., Tian J. et al. Water absorption and property evolution of epoxy resin under hygrothermal environment // *Journal of Materials Research and Technology*. 2024. V. 31. P. 3982–3997. doi: 10.1016/j.jmrt.2024.07.123
- 4 Uthaman A., Xian G., Thomas S. et al. Durability of an Epoxy Resin and Its Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composite upon Immersion in Water, Acidic, and Alkaline Environments // *Polymers*. 2020. V. 12. P. 614. doi: 10.3390/polym12030614
- 5 Borges C., Marques E.A.S., Carbas R.J.C. et al. Review on the Effect of Moisture and Contamination on the Interfacial Properties of Adhesive Joints // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2020. V. 235. № 3. P. 527–549. doi: 10.1177/0954406220944208
- 6 Jones F.R. Durability of reinforced plastics in liquid environments // Pritchard G. (ed.) *Reinforced Plastics Durability*. CRC Press, 1999. P. 70–110. doi: 10.1201/9781420050640.ch4
- 7 Searle T.J., Summerscales J. Review of the durability of marine laminates // Pritchard G. (ed.) *Reinforced Plastics Durability*. CRC Press, 1999. P. 219–266. doi: 10.1201/9781420050640.ch10
- 8 Garcia-Espinel J.D., Castro-Fresno D., Parbole-Borrego P. et al. Effects of sea water environment on glass fiber reinforced plastic materials used for marine civil engineering constructions // *Materials & Design*. 2015. V. 66. Pt. A. P. 46–50. doi: 10.1016/j.matdes.2014.10.042
- 9 Hawa A., Abdul Majid M.S., Afendi M., Marzuki H.F.A. et al. Burst strength and impact behaviour of hydrothermally aged glass fibre/epoxy composite pipes // *Materials & Design*. 2016. V. 89. P. 455–464. doi: 10.1016/j.matdes.2015.10.008
- 10 Yamilinets S.Yu., Konukhov V.Yu., Yamilinets V.Yu. et al. Capillary effect in the layers of rubber-fabric composites // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2024. V. 58. № 4. P. 1334–1339. doi: 10.1134/S0040579524601948
- 11 Assarar M., Scida D., El Mahi A., Poilâne C. et al. Influence of water ageing on mechanical properties and damage events of two reinforced composite materials: flax-fibres and glass-fibres // *Materials & Design*. 2011. V. 32. № 2. P. 788–795. doi: 10.1016/j.matdes.2010.07.024
- 12 Weitsman Y.J. *Fluid Effects in Polymers and Polymeric Composites*. New York: Springer Science & Business Media, 2011. doi: 10.1007/978-1-4419-9533-9
- 13 Berkettis K., Tzetzis D., Hogg P.J. The influence of long term water immersion ageing on impact damage behaviour and residual compression strength of glass fibre reinforced polymer (GFRP) // *Materials & Design*. 2008. V. 29. № 7. P. 1300–1310. doi: 10.1016/j.matdes.2007.07.001
- 14 Jacquemin F., Vautrin A., Fréour S. A thermodynamical approach to model coupled hygro-mechanical phenomena in polymers under symmetrical and asymmetrical mechanical loads // *International Journal of Solids and Structures*. 2018. (Примечание: требуются том, номер, страницы, DOI)
- 15 Derrien K., Gilormini P. The effect of moisture-induced swelling on the absorption capacity of transversely isotropic elastic polymer–matrix composites // *International Journal of Solids and Structures*. 2009. V. 46. № 6. P. 1547–1553. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2008.11.014
- 16 Startsev V.O., Molokov M.V., Kuperman A.M. et al. Effect of outdoor exposure on the moisture diffusion and mechanical properties of epoxy polymers // *Polymer Testing*. 2018. V. 65. P. 281–296. doi: 10.1016/j.polymertesting.2017.12.007
- 17 Becker O., Varley R.J., Simon G.P. Thermal stability and water uptake of high performance epoxy layered silicate nanocomposites // *European Polymer Journal*. 2004. V. 40. № 1. P. 187–195. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2003.09.008
- 18 Ozeren Ozgul E., Ozkul M.H. Effects of epoxy, hardener, and diluent types on the hardened state properties of epoxy mortars // *Construction and Building Materials*. 2018. V. 187. P. 360–370. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.215
- 19 Varganici C.D., Rosu L., Rosca I. et al. Surface Degradation of DGEBA Epoxy Resins Cured with Structurally Different Amine Hardeners: Effects of UV Radiation // *Polymers*. 2024. V. 16. P. 67. doi: 10.3390/polym16010067
- 20 Morsch S., Wand C.R., Gibbon S., Irwin M. et al. The effect of cross-linker structure on interfacial interactions, polymer dynamics and network composition in an epoxy-amine resin // *Applied Surface Science*. 2022. V. 606. P. 155380. doi: 10.1016/j.apsusc.2022.155380
- 21 McConnell B.K., Pethrick R.A. Dielectric studies of water absorption and desorption in epoxy resins: influence of cure process on behaviour // *Polymer International*. 2008. V. 57. № 5. P. 689–699. doi: 10.1002/pi.2324
- 22 Pereira A.A.C., d'Almeida J.R.M. Effect of the hardener to epoxy monomer ratio on the water absorption behavior of the DGEBA/TETA epoxy system // *Polimeros*. 2016. V. 26. № 1. P. 30–37. doi: 10.1590/0104-1428.2106
- 23 Bignotti F., Pandini S., Baldi F. et al. Effect of the resin/hardener ratio on curing, structure and glass transition temperature of nanofilled epoxies // *Polymer Composites*. 2011. V. 32. № 7. P. 1034–1048. doi: 10.1002/pc.21120
- 24 Taysun M.B., Dam-Johansen K., Bi H. Hydrogen bonding and anti-plasticization in epoxy coatings: Molecular insights into water uptake and network stability // *Progress in Organic Coatings*. 2025. V. 200. P. 109602. doi: 10.1016/j.porgcoat.2025.109602
- 25 Morsch S., Lyon S., Greensmith P., Smith S.D. et al. Water transport in an epoxy–phenolic coating // *Progress in Organic Coatings*. 2015. V. 78. P. 293–299. doi: 10.1016/j.porgcoat.2014.08.006
- 26 Morsch S., Lyon S., Smith S.D., Gibbon S.R. Mapping water uptake in an epoxy-phenolic coating // *Progress in Organic Coatings*. 2015. V. 86. P. 173–180. doi: 10.1016/j.porgcoat.2015.05.017
- 27 Конохов В.Ю., Ямилинец В.Ю., Литвинов Д.С. и др. Термодинамика скрытой маркировки упаковки из прозрачной термоусадочной пленки // *Вестник ВГУИТ*. 2025. Т. 87. № 2. С. 121–128. doi: 10.20914/2310-1202-2025-2-121-128
- 28 Wazarkar K., Sabnis A.S. Phenalkamine Curing Agents for Epoxy Resin: Characterization and Structure Property Relationship // *Pigment & Resin Technology*. 2018. V. 47. № 4. P. 281–289. doi: 10.1108/PRT-08-2017-0071

References

- 1 Studenikina L.N., Domareva S.Yu., Golenskikh Yu.E., Matveeva A.V. Features of highly filled composites based on various grades of polyvinyl alcohol. *Bulletin of VSUET*. 2021. vol. 83. no. 1. pp. 316–322. doi: 10.20914/2310-1202-2021-1-316-322 (in Russian).
- 2 Kouser T., Nur F., Aliyu A., Altaf F. et al. Applications of epoxy resins as a coating technology in fluid systems. *ChemBioEng*. 2025. vol. 12. no. 2. article e70000. doi: 10.1002/cben.70000.
- 3 Xian G., Niu Y., Qi X., Tian J. et al. Water absorption and property evolution of epoxy resin under hygrothermal environment. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024. vol. 31. no. 4. pp. 3982–3997. doi: 10.1016/j.jmrt.2024.07.123.
- 4 Uthaman A. et al. Durability of an Epoxy Resin and Its Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composite upon Immersion in Water, Acidic, and Alkaline Environments. *Polymers*. 2020. vol. 12. article 614. doi: 10.3390/polym12030614.
- 5 Borges C. et al. Review on the Effect of Moisture and Contamination on the Interfacial Properties of Adhesive Joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2020. vol. 235. no. 3. pp. 527–549. doi: 10.1177/0954406220944208.
- 6 Jones F.R. Durability of reinforced plastics in liquid environments. In: Pritchard G. (ed.) *Reinforced Plastics Durability*. CRC Press, 1999. pp. 70–110.
- 7 Searle T.J., Summerscales J. Review of the durability of marine laminates. In: Pritchard G. (ed.) *Reinforced Plastics Durability*. CRC Press, 1999. pp. 219–266.
- 8 Garcia-Espinell J.D. et al. Effects of sea water environment on glass fiber reinforced plastic materials used for marine civil engineering constructions. *Materials & Design*. 2015. vol. 66. pt. A. pp. 46–50.
- 9 Hawa A., Abdul Majid M.S., Afendi M., Marzuki H.F.A. et al. Burst strength and impact behaviour of hydrothermally aged glass fibre/epoxy composite pipes. *Materials & Design*. 2016. vol. 89. pp. 455–464.
- 10 Yamilinet S.Yu. et al. Capillary effect in the layers of rubber-fabric composites. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2024. vol. 58. no. 4. pp. 1334–1339. doi: 10.1134/S0040579524601948.
- 11 Assarar M., Scida D., EL Mahi A., Poilâne C. et al. Influence of water ageing on mechanical properties and damage events of two reinforced composite materials: flax-fibres and glass-fibres. *Materials & Design*. 2011. vol. 32. no. 2. pp. 788–795.
- 12 Weitsman Y.J. *Fluid Effects in Polymers and Polymeric Composites*. New York: Springer Science & Business Media, 2011.
- 13 Berketic K. et al. The influence of long term water immersion ageing on impact damage behaviour and residual compression strength of glass fibre reinforced polymer (GFRP). *Materials & Design*. 2008. vol. 29. no. 7. pp. 1300–1310.
- 14 Jacquemin F., Vautrin A., Fréour S. A thermodynamical approach to model coupled hygro-mechanical phenomena in polymers under symmetrical and asymmetrical mechanical loads. *International Journal of Solids and Structures*. 2018.
- 15 Derrien K., Gilormini P. The effect of moisture-induced swelling on the absorption capacity of transversely isotropic elastic polymer–matrix composites. *International Journal of Solids and Structures*. 2009. vol. 46. no. 6. pp. 1547–1553. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2008.11.014.
- 16 Startsev V.O. et al. Effect of outdoor exposure on the moisture diffusion and mechanical properties of epoxy polymers. *Polymer Testing*. 2018. vol. 65. pp. 281–296. doi: 10.1016/j.polymeresting.2017.12.007.
- 17 Becker O., Varley R.J., Simon G.P. Thermal stability and water uptake of high performance epoxy layered silicate nanocomposites. *European Polymer Journal*. 2004. vol. 40. no. 1. pp. 187–195. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2003.09.008.
- 18 Ozeren Ozgul E., Ozkul M.H. Effects of epoxy, hardener, and diluent types on the hardened state properties of epoxy mortars. *Construction and Building Materials*. 2018. vol. 187. pp. 360–370. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.215.
- 19 Varganici C.D., Rosu L., Rosu D., Rosca I. et al. Surface Degradation of DGEBA Epoxy Resins Cured with Structurally Different Amine Hardeners: Effects of UV Radiation. *Polymers*. 2024. vol. 16. article 67. doi: 10.3390/polym16010067.
- 20 Morsch S., Wand C.R., Gibbon S., Irwin M. et al. The effect of cross-linker structure on interfacial interactions, polymer dynamics and network composition in an epoxy-amine resin. *Applied Surface Science*. 2022. vol. 606. article 155380. doi: 10.1016/j.apsusc.2022.155380.
- 21 McConnell B.K., Pethrick R.A. Dielectric studies of water absorption and desorption in epoxy resins: influence of cure process on behaviour. *Polymer International*. 2008. vol. 57. no. 5. pp. 689–699. doi: 10.1002/pi.2324.
- 22 Pereira A.A.C., d'Almeida J.R.M. Effect of the hardener to epoxy monomer ratio on the water absorption behavior of the DGEBA/TETA epoxy system. *Polimeros*. 2016. vol. 26. no. 1. pp. 30–37. doi: 10.1590/0104-1428.2106.
- 23 Bignotti F. et al. Effect of the resin/hardener ratio on curing, structure and glass transition temperature of nanofilled epoxies. *Polymer Composites*. 2011. vol. 32. no. 7. pp. 1034–1048. doi: 10.1002/pc.21120.
- 24 Taysun M.B., Dam-Johansen K., Bi H. Hydrogen bonding and anti-plasticization in epoxy coatings: Molecular insights into water uptake and network stability. *Progress in Organic Coatings*. 2025. vol. 200. article 109602. doi: 10.1016/j.porgcoat.2025.109602.
- 25 Morsch S., Lyon S., Greensmith P., Smith S.D. et al. Water transport in an epoxy–phenolic coating. *Progress in Organic Coatings*. 2015. vol. 78. pp. 293–299. doi: 10.1016/j.porgcoat.2014.08.006.
- 26 Morsch S., Lyon S., Smith S.D., Gibbon S.R. Mapping water uptake in an epoxy-phenolic coating. *Progress in Organic Coatings*. 2015. vol. 86. pp. 173–180. doi: 10.1016/j.porgcoat.2015.05.017.
- 27 Konyukhov V.Yu. et al. Thermodynamics of hidden marking of packaging made of transparent shrink film. *Bulletin of VSUET*. 2025. vol. 87. no. 2. pp. 121–128. doi: 10.20914/2310-1202-2025-2-121-128 (in Russian).
- 28 Wazarkar K., Sabnis A.S. Phenalkamine Curing Agents for Epoxy Resin: Characterization and Structure Property Relationship. *Pigment & Resin Technology*. 2018. vol. 47. no. 4. pp. 281–289. doi: 10.1108/prt-08-2017-0071.

Сведения об авторах

Никита И. Щегольков аспирант, полиграфический факультет, Московский Политехнический университет, ул. Большая Семеновская 38., г. Москва, 107023, Россия, shegolknovnicita@ya.ru

 <https://orcid.org/0009-0002-5422-4061>

Людмила Ю. Комарова к.т.н., доцент, полиграфический факультет, Московский Политехнический университет, ул. Большая Семеновская 38, г. Москва, 107023, Россия, luknew@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-3005-6411>


Александр И. Цыбин к.х.н., технический директор, лаборатория, ООО «Техновацинк», ул. 2-я Энтузиастов, д.5, к. 3, Москва, 111024, Россия, tsybin.a@tnzinc.ru

 <https://orcid.org/0009-0008-0457-7460>

Валерий Ю. Конюхов д.х.н., профессор, кафедра общей химии (№19) института общей профессиональной подготовки, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Каширское ш., 31, г. Москва, 115409, Россия, volkon_1@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-6128-9413>

Александр П. Кондратов д.т.н., профессор, полиграфический факультет, Московский Политехнический университет, ул. Большая Семеновская 38, г. Москва, 107023, Россия, apkrezerv@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6118-0808>

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Nikita I. Shchegolkov graduate student, polygraphic institute, Moscow Polytechnic University, st. Bolesnaya Semenovskaja,.38, Moscow, 107023, Russia, shegolknovnicita@ya.ru

 <https://orcid.org/0009-0002-5422-4061>


Lyudmila Yu. Komarova Cand. Sci. (Engin.), associate professor, polygraphic institute, Moscow Polytechnic University, st. Bolesnaya Semenovskaja,.38, Moscow, 107023, Russia, luknew@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-3005-6411>


Alexander I. Tsybin Cand. Sci. (Chem), technical director, laboratory, LLC «Technovatsink», 2-ya Entuziastov St., Bld. 5, Unit 3, Moscow, 111024, Russia , tsybin.a@tnzinc.ru

 <https://orcid.org/0009-0008-0457-7460>

Valery Y. Konyukhov Dr. Sci. (Chem.), professor , department of General Chemistry (No. 19) of the Institute of General Professional Training, National Research Nuclear University MEPhI, Kashirskoe shosse, 31, Moscow, 107023, Russia, volkon_1@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-6128-9413>

Alexander P. Kondratov Dr. Sci. (Engin), professor, polygraphic institute, Moscow Polytechnic University, st. Bolesnaya Semenovskaja,.38, Moscow, 107023, Russia, apkrezerv@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-6118-0808>

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 21/03/2026	После редакции 18/04/2026	Принята в печать 13/05/2026
Received 21/03/2026	Accepted in revised 18/04/2026	Accepted 13/05/2026