

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ОТВЕРЖДЕНИЯ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ

И.Н. Вихарева[✉], П.А. Кручинина, Д.В. Николаев, И.Т. Шарапова
Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия
[✉] vikharevain@susu.ru

Аннотация. Эпоксидные смолы лидируют по использованию в области создания композиционных материалов. Несмотря на уникальные характеристики, обеспечивающие высокие объемы потребления, подобным смолам присущи определенные недостатки: высокая вязкость, низкая устойчивость к атмосферному воздействию. С целью снижения негативных технологических факторов при использовании эпоксидной смолы в качестве термореактивного связующего для композиции исследована менее вязкая эпоксиаминная смола. Для придания эластичных свойств модификацию смолы проводили двумя компонентами: полиэфиром на основе себаценовой кислоты и полиамидным отвердителем. Отверждение композиций осуществляли в различных температурных режимах. В работе показано образование сшитого полимерного продукта, а также влияние температурных режимов на степень отверждения полимерных пленок. Исследованы важные физико-механические и эксплуатационные характеристики полученных образцов. Определена взаимосвязь полученных показателей и температурных режимов обработки композиции.

Ключевые слова: отвердитель, поликонденсация, полиэфир, полиамин, эпоксиаминная смола

Для цитирования: Влияние температурных режимов отверждения на физико-химические характеристики модифицированной эпоксидной смолы / И.Н. Вихарева, П.А. Кручинина, Д.В. Николаев, И.Т. Шарапова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2025. Т. 17, № 1. С. 149–159. DOI: 10.14529/chem250114

Original article
DOI: 10.14529/chem250114

THE EFFECT OF CURING TEMPERATURE MODES ON THE PHYSICO-CHEMICAL CHARACTERISTICS OF MODIFIED EPOXY RESIN

I.N. Vikhareva[✉], P.A. Kruchinina, D.V. Nikolaev, I.T. Sharapova
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia
[✉] vikharevain@susu.ru

Abstract. Epoxy resins are the leading resins used in the field of composite materials. Despite the unique characteristics, guaranteeing high volumes of consumption, these resins have certain disadvantages: high viscosity, low resistance to atmospheric influence. In order to reduce negative technological factors when epoxy resin is used as a thermosetting binder for composition, less viscous epoxyamine resin was studied. To impart elastic properties, a modification of this resin was carried out with two components: polyester based on sebacic acid and polyamide hardener. Curing of compositions was carried out at different temperature modes. The formation of a cross-linked polymer product, as well as the influence of temperature modes on the degree of curing of polymer films, was described. Important physico-mechanical and operational characteristics of the obtained samples were investigated. The correlation between the obtained parameters and temperature modes of composite processing was determined.

Keywords: hardener, polycondensation, polyester, polyamine, epoxyamine resin

For citation: Vikhareva I.N., Kruchinina P.A., Nikolaev D.V., Sharapova I.T. The effect of curing temperature modes on the physico-chemical characteristics of modified epoxy resin. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chem.* 2025;17(1):149–159. (In Russ.) DOI: 10.14529/chem250114

Введение

Полимерные композиционные материалы получили широкое применение в различных областях промышленности. Большая часть из них в качестве связующего содержит эпоксидные смолы [1–3]. Использование эпоксидных связующих обусловлено совокупностью их уникальных характеристик: низкая усадка, высокая реакционная способность, водо- и химическая стойкость, термостойкость, технологичность [4].

Однако переработка высоковязких диановых смол совмещена с некоторыми технологическими проблемами [5]. С этой целью обычно используют разбавители. Введение в состав неакционноспособных разбавителей приводит к снижению физико-механических свойств и химической стойкости получаемых материалов. Поэтому с целью снижения вязкости композиций в состав вводят реакционноспособные разбавители либо достигают такого же эффекта за счет выбора низковязкого отвердителя [6–9].

В качестве активного бифункционального разбавителя известно применение эпоксиаминной смолы, которая представляет низковязкий продукт реакции анилина с эпихлоргидрином. Высокое содержание эпоксидных групп способно придавать отвержденной композиции улучшенные физико-химические свойства. Помимо этого, смола ЭА отлично совмещается с полиэфирными смолами. Диэлектрические и физико-механические свойства смолы при отверждении аналогичны свойствам диановых смол.

В качестве полиэфирных модификаторов применяют продукты конденсации полиспиртов с кислотами неперелогого и перелогого алифатического ряда, а также с ароматическими кислотами [10–12]. Основное назначение полиэфирных модификаторов – улучшение технологических свойств эпоксидных композиций. Прочностные и диэлектрические показатели полимеров на основе диановых смол, модифицированных полиэфирами в количестве 15–20 масс. ч. на 100 масс. ч. эпоксидной смолы, и немодифицированных смол существенных отличий не имеют [13]. Пластики на основе эпоксидно-полиэфирных смол имеют высокие прочностные показатели и повышенную устойчивость к атмосферному воздействию и солнечной радиации [14–15].

Использование различных отвердителей и применение диановых смол с различной длиной молекулярной цепи обеспечивает изменение физико-механических свойств получаемых полимеров в широких пределах: от резиноподобных в обычных условиях материалов до жестких, высокопрочных и высокомодульных с сохранением прочностных показателей в условиях длительного воздействия температур до 200 °С и выше [16–19]. Благодаря наличию в некоторых марках диановых смол большого количества гидроксильных групп для отверждения можно использовать соединения, содержащие активный водород, и получать при этом полимеры с ценными свойствами [20–22]. Таким образом, влияние химического строения отвердителей на физико-механические свойства полимеров имеет решающее значение [23–24].

При комнатной температуре отверждение диановых смол обычно осуществляют алифатическими аминами или их производными [25–26]. Наиболее широко применяемыми первичными алифатическими аминами являются этилендиамин, диэтилентриамин, триэтилентетраамин, гексаметилендиамин, а также техническая смесь аминов – полиэтиленполиамины, состоящая из смеси 25 соединений, в состав которой входят 4 первых. Все перечисленные амины являются достаточно летучими и токсичными веществами, обеспечивающими ограниченную жизнеспособность композиций на основе диановых смол и удовлетворительные физико-механические свойства.

Помимо этого, отвердители оказывают существенное влияние на скорость реакции сшивания, режим отверждения и характеристики целевого продукта [27–29]. Существует несколько технологий образования сетчатого полимера, но отвердители улучшают механизм полимеризации и позволяют достичь максимальных свойств продукта. Поскольку в полимерной структуре происходит постотверждение, сшивающее вещество обеспечивает завершение полимеризации, вступая в реакцию с полимером. Разработка высокоэффективных и экологически чистых эпоксидных термореактивных материалов остается сложной задачей, для решения которой необходим поиск и определение отвердителя для получения трехмерной сетки полимера с наилучшими характеристиками.

В связи с этим в работе для получения пленок в качестве отвердителя был исследован полиамид – продукт взаимодействия полимеризованных жирных кислот растительных масел и поли-

этиленполиаминов, для которого характерна низкая токсичность, хорошая химическая стойкость получаемых полимеров, устойчивость к воздействию минеральных кислот, водных растворов щелочей, воде и углеводородам. С целью модификации эпоксидной смолы был использован насыщенный полиэфир на основе себаценовой кислоты.

Экспериментальная часть

Материалы и методы

Полиэфир 24К – продукт поликонденсации этиленгликоля и глицерина с себаценовой кислотой, который был приобретён у компании Abika, Москва, Россия. Полиэфир 24К представляет собой массу, подобную парафину, серого до тёмно-серого или коричневого цвета. Исходные компоненты для производства полиэфира показаны на рис. 1.

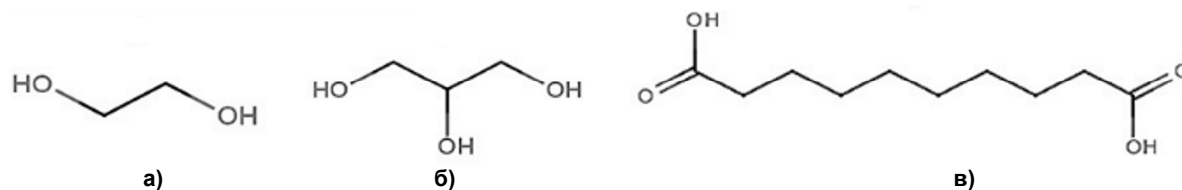


Рис. 1. Начальные компоненты для производства полиэфира 24К:
а – этиленгликоль; б – глицерин; в – себаценовая кислота

Основные характеристики смолы представлены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства полиэфира 24К

Название показателя	Значение
Внешний вид	Парафинообразная масса от серого до темно-серого или коричневого цвета
Плотность 50% раствора полиэфира в ацетоне при 20 °С, г/см ³	0,93–0,94
Динамическая вязкость раствора полиэфира в ацетоне с массовой долей 50 % при 20 °С, МПа·с	20–30
Кислотное число, мг КОН на 1 г полиэфира	8–18
Массовая доля гидроксильных групп, %	5,2–8,0
Массовая доля воды, %	Не более 0,3

Эпоксисаминная смола (ЭА) (рис. 2) является продуктом реакции анилина с эпихлоргидрином и производится компанией ООО «КурскХимПром», Курск, Россия. Смола представляет собой жидкость от желто-коричневого до темно-красного цвета. Основные характеристики смолы представлены в табл. 2.

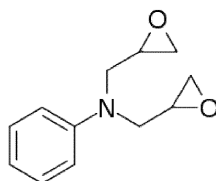


Рис. 2. Эпоксисаминная смола

Таблица 2

Свойства эпоксисаминной смолы

Название индикатора	Значение
Массовая доля эпоксидных групп, %, не менее	31,2
Массовая доля летучих веществ, %, не более	1,2
Массовая доля ионов хлора, %, не более	0,035
Массовая доля сапонифицированного хлора, %, не более	1,5
Динамическая вязкость при 25 °С, Па·с, не более	0,35

Отвердитель Л-18 (рис. 3) – продукт взаимодействия полимеризованных жирных кислот растительных масел и полиэтиленполиаминов, приобретен в ООО «КурскХимПром», г. Курск, Россия. Отвердитель представляет собой однородную прозрачную вязкую жидкость от желтого до темно-коричневого цвета. Основные характеристики смолы приведены в табл. 3.

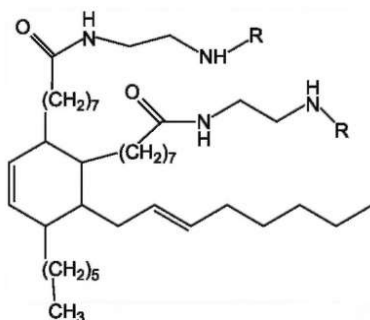


Рис. 3. Отвердитель

Таблица 3

Свойства отвердителя

Название индикатора	Значение
Аминное число, мг HCl/г	90–120
Аминное число, мг KOH /г	139–185
Массовая доля нелетучих веществ, %	100
Динамическая вязкость при 20 °С, Па · с, не более	10–50

Метод получения образцов

Образцы полимерных пленок получены смешением компонентов: полиэфирной и эпоксиаминной смол и отвердителя в определенных соотношениях. Составы заливали в силиконовые формы и выдерживали согласно выбранным режимам. Режимы отверждения пленок описаны ниже. Для физико-механических испытаний из пленок были вырублены лопатки (рис. 4) с помощью пневматического вырубного пресса.

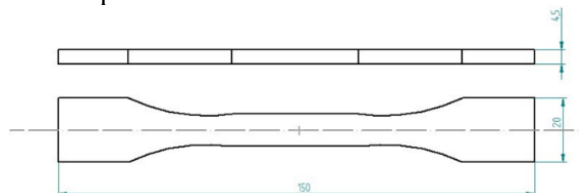


Рис. 4. Тип и размеры образца для испытаний

Методы анализа образцов

ИК-спектры. Образцы полученных продуктов анализировали методом ИК-Фурье спектроскопии (таблетки KBr), которые готовили по стандартной методике. ИК-спектры поглощения регистрировали в диапазоне $450\text{--}3700\text{ см}^{-1}$ с помощью Фурье-спектрометра IRAffinity-1S (Shimadzu) при комнатной температуре. Разрешение 4 см^{-1} , число сканирований 20.

Степень отверждения полимера определена экстрагированием пленок в течение 24 часов в ацетоне. Масса образца составляла приблизительно 1 г. Навеску взвешивали с точностью до 0,001 г и помещали в растворитель. Затем образец полимерной пленки взвешивали с точностью до 0,001 г и сушили в вакуумном шкафу. Степень отверждения вычисляли.

Определение плотности производили взвешиванием на весах с погрешностью измерения 0,0001 г.

Физико-механические испытания проведены на универсальной испытательной машине INSTRON 5900R. Для измерения продольной деформации образцов, а также определения модуля упругости использовался видеоэкстензометр. Модуль упругости определялся на участке кривой деформирования 0,05–0,25 %. Деформация разрушения фиксировалась при максимальной нагрузке.

Прочность при разрыве измеряли при $T = 23 \pm 2$ °С. Образцы композиции предварительно кондиционировали. В качестве величины начального поперечного сечения образцов применяли среднее арифметическое значение толщины и ширины, измеренной в трех местах. Образцы с нанесенными метками закрепляли в испытательную машину таким образом, чтобы направление движения подвижного зажима соответствовало направлению осей зажимов и образца.

Значение прочности при разрыве пленок (Н/мм (МПа)) определяли на вырубленных образцах.

Относительное удлинение при разрыве определяли при $T = 23 \pm 2$ °С. Образцы помещали в испытательную машину аналогично определению прочности при разрыве. Для устранения смещения образца при испытании зажимы испытательной машины затягивались равномерно.

Термогравиметрический анализ полимеров осуществляли на приборе Netzsch STA 449 F3 Jupiter. Для этого образец массой 5–20 мг помещали в платиновый тигель. Температура эксперимента в приборе составляет от 25 до 500 °С, скорость нагрева – 10 К/мин в атмосфере воздуха со скоростью продувки 30 мл/мин. В ходе эксперимента получены зависимости потери массы образца от температуры.

ДСК анализ образцов осуществляли на приборе Netzsch STA 449 F3 Jupiter. Для этого образец массой 5–20 мг помещали в платиновый тигель. Температура эксперимента в приборе составляет от 25 до 250 °С, скорость нагрева – 5 К/мин в атмосфере аргона со скоростью продувки 60 мл/мин. В ходе эксперимента получены зависимости тепловых эффектов образца от температуры.

Краевой угол смачивания измеряли методом лежащей капли.

Результаты и обсуждение

На основании предварительных экспериментов установлены соотношения компонентов для получения полимерных образцов: ЭА : ПЭ : Л-18 = 3 : 2 : 4. Обозначения образцов и их режимы отверждения представлены в табл. 4.

Обозначения образцов и их режимы отверждения

Таблица 4

Образец	Режим отверждения
1	22 °С / 56 ч
2	22 °С / 24 ч 60 °С / 1 ч 80 °С / 1 ч
3	22 °С / 24 ч 80 °С / 1 ч 100 °С / 1 ч 120 °С / 1 ч
4	60 °С / 1 ч 80 °С / 1 ч 120 °С / 1 ч
5	22 °С / 24 ч 80 °С / 1 ч 120 °С / 3 ч

Полученные пластины толщиной приблизительно 3 мм представляли собой пластичные полимеры.

Протекание реакции между компонентами смеси и получение полимера подтверждено ИК-спектрами (рис. 5). На полученных ИК-спектрах образцов и полиэфир в области 3480 см^{-1} присутствуют сигналы группы ОН. В образце 1 и исходном полиэфире наблюдается достаточно интенсивный сигнал. В то время как в образце 5 сигнал менее интенсивный. Важно учесть, что в полученных образцах в отличие от исходного ПЭ в данной области проявляется пик NH группы.

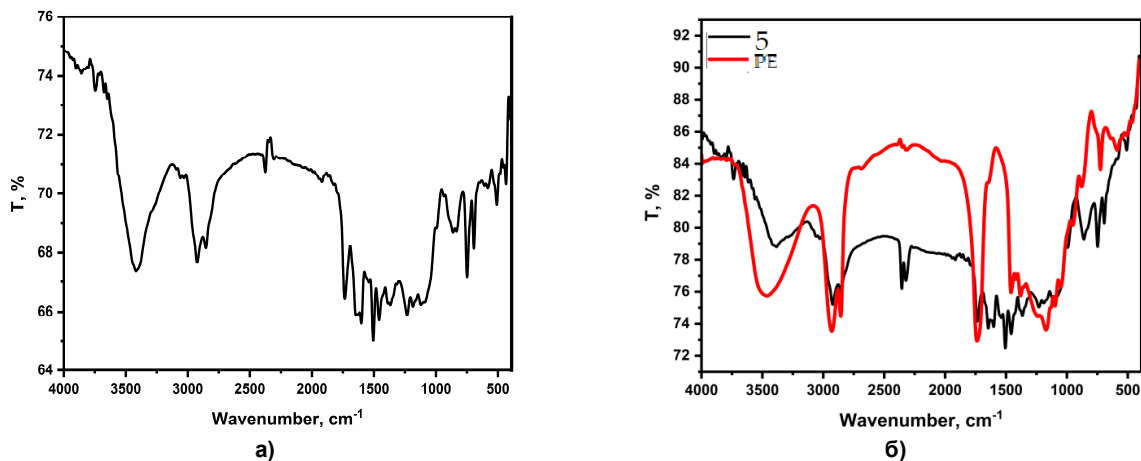


Рис. 5. ИК-спектры образцов: а – образец 1; б – образец 5 и полиэфир

Таким образом, определенная часть гидроксогрупп вступила во взаимодействие. В области 1720 см^{-1} наблюдается характерный сигнал карбонильной группы карбоновых кислот. Этот пик в сшитых образцах гораздо менее интенсивный, чем в ПЭ. Пик в области $1200\text{--}1350\text{ см}^{-1}$ в спектрах образцов, характерный для карбонильной группы сложных эфиров, отсутствует в спектре полиэфира.

Степень отверждения образцов определена по количеству золь фракции (табл. 5). Количество золь фракции в сшитом полимере уменьшается с увеличением температурного режима обработки.

Таблица 5
Количество золь фракции в образцах

Образец	Количество золь фракции, %
1	21,78
2	27,54
3	20,69
4	27,15
5	24,21

Однако образец без нагрева **1** не характеризуется наибольшим количеством несшитого преполимера. Вероятно, процессы отверждения в образце протекают в течение продолжительного времени даже без термообработки. Нагрев массы сразу после смешения компонентов не улучшает степень отверждения образца **4**. Наибольшую степень отверждения из всех представленных образцов показал полимер **3**, который нагревали постепенно до максимальной температуры, в отличие от образца **5**, который нагревали менее плавно.

Значения плотности полученных образцов пленок представлены в табл. 6.

Таблица 6
Значения плотности полимерных образцов

Образец	Значения плотности, г/см ³
1	1,21
2	1,30
3	1,22
4	1,34
5	1,10

Полученные результаты плотности образцов сшитых полимеров хорошо коррелируют с температурными режимами обработки. Например, образец **5** был подвергнут наиболее длительному и интенсивному нагреву, что способствовало наиболее полному испарению легколетучих компонентов, не участвующих в сшивке полимерной сетки.

Определение физико-механических характеристик полученных образцов проводили на вырубленных лопатках согласно рис. 4 (табл. 7, рис. 6). В качестве сравнения приведены показатели полимерного образца без добавления полиэфира (эталон).

Таблица 7
Физико-механические характеристики пленок

Образец	Модуль упругости, МПа	Напряжение при растяжении, МПа	Деформация при растяжении, %	Перемещение, мм	Максимум сила, Н
Эталон	37,57	2,54	72,05	44,83	54,79
1	2,56	0,43	34,99	21,77	6,08
2	2,67	0,59	42,27	22,65	6,66
3	2,75	0,72	48,76	23,53	9,67
4	3,62	0,89	54,28	26,35	14,89
5	4,36	1,12	59,10	30,05	24,12

Результаты физико-механических характеристик хорошо согласуются с режимами отверждения образцов: повышение температуры при обработке образцов обеспечивает повышение показателей всех исследованных характеристик. Можно выделить характерную особенность – сни-

жение пластичности при увеличении температуры отверждения, что подтверждается полученными значениями модуля. Важно отметить, введение полиэфира в рецептуру приводит к снижению прочностных характеристик композита по сравнению с базовой рецептурой, что отражено в большом количестве исследований.

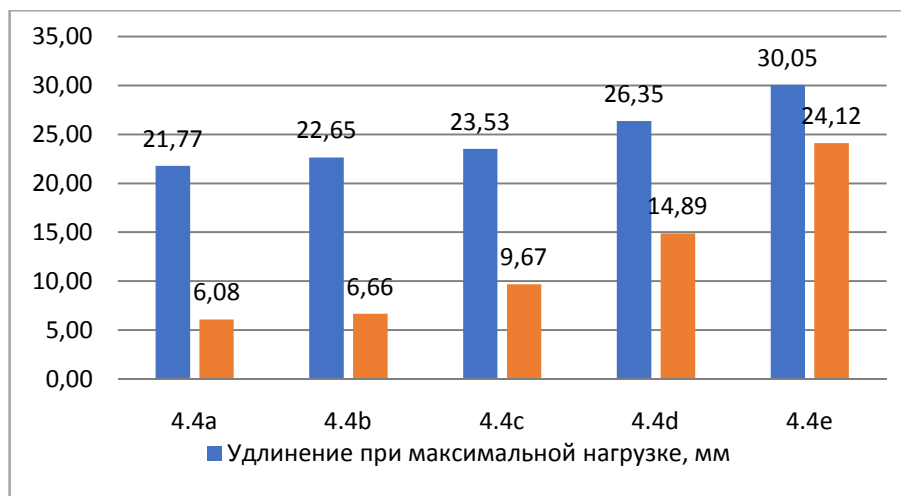


Рис. 6. Сравнение характеристик полимерных образцов

Полученные результаты термоанализа сополимеров приведены в табл. 8. Термогравиметрические кривые представлены на рис. 7–11.

Таблица 8

Результаты термоанализа сополимеров

Образец	Δm (0–150 °C), %	Δm (150–300 °C), %	Δm (300–450 °C), %	Δm (450–600 °C), %	$m_{ост}$, Г
1	5,11	15,79	58,27	17,29	4,42
2	1,77	15,46	61,79	16,52	4,46
3	1,87	11,38	65,84	16,53	4,38
4	1,67	10,87	63,77	18,57	5,12
5	0,23	7,39	67,22	19,76	5,40

Термическая стабильность полимеров важна для установления технологичности их переработки. Термогравиметрия образцов показала, что наибольшей термостойкостью обладает образец 5, который подвергали наибольшей температурной обработке. На ДТГ кривой образца 2 (табл. 8, рис. 8) наблюдается наибольшее количество пиков, соответствующих процессам доотверждения в области 250–350 °C. Наименее интенсивно процессы доотверждения протекают в образце без тепловой обработки. Вероятно, сшивка компонентов протекала при длительном хранении. Однако для данного образца характерно наличие наибольшего количества легколетучих компонентов, что отражается на кривой ТГ в виде наибольшей потери массы в области до 150 °C. В общем, пики на кривой ДТГ при переходе от образца 1 к образцу 5 (табл. 8, рис. 7–11) постепенно сдвигаются в область высоких температур (более 400 °C), где происходят процессы разложения и окисления (образец 5). Закономерность увеличения термостабильности отчетливо прослеживается для образцов в ряду 1...5 (табл. 7).

Варьированием структуры и свойств олигомерного связующего можно регулировать характер межфазных взаимодействий на границе раздела, что приводит к изменению свойств получаемых композиционных материалов. К межфазным явлениям на границе раздела фаз относится смачивание. Исследование смачивания является важным аспектом при создании композиционных материалов. Полученные результаты по определению краевого угла смачивания водой представлены в табл. 9.

Таблица 9

Значения краевых углов смачивания полимерных образцов

Образец	Краевой угол смачивания, град (θ)	$\cos \theta$	W_a , мДж/м ²	K_p , мДж/м ²
1	79,9	0,18	85,85	-59,66
2	81,0	0,16	84,39	-61,11
3	85,3	0,08	78,72	-66,78
4	88,0	0,04	75,30	-70,20
5	91,0	-0,02	71,27	-74,23

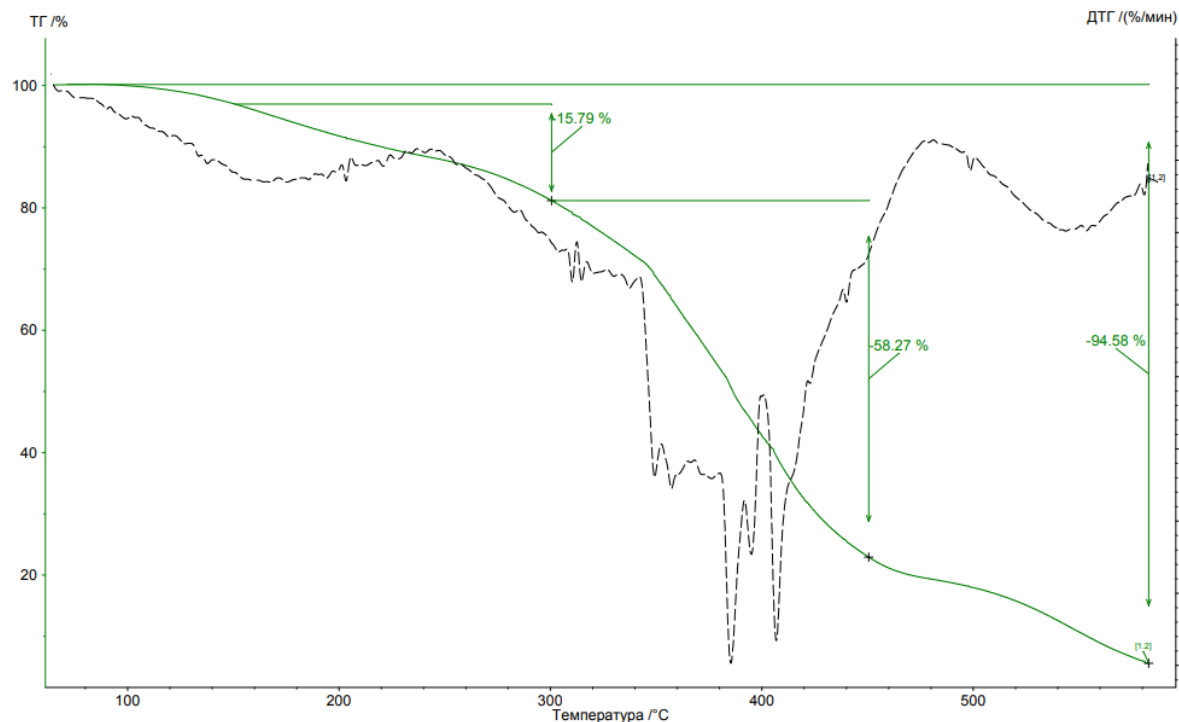


Рис. 7. ТГ кривая образца 1

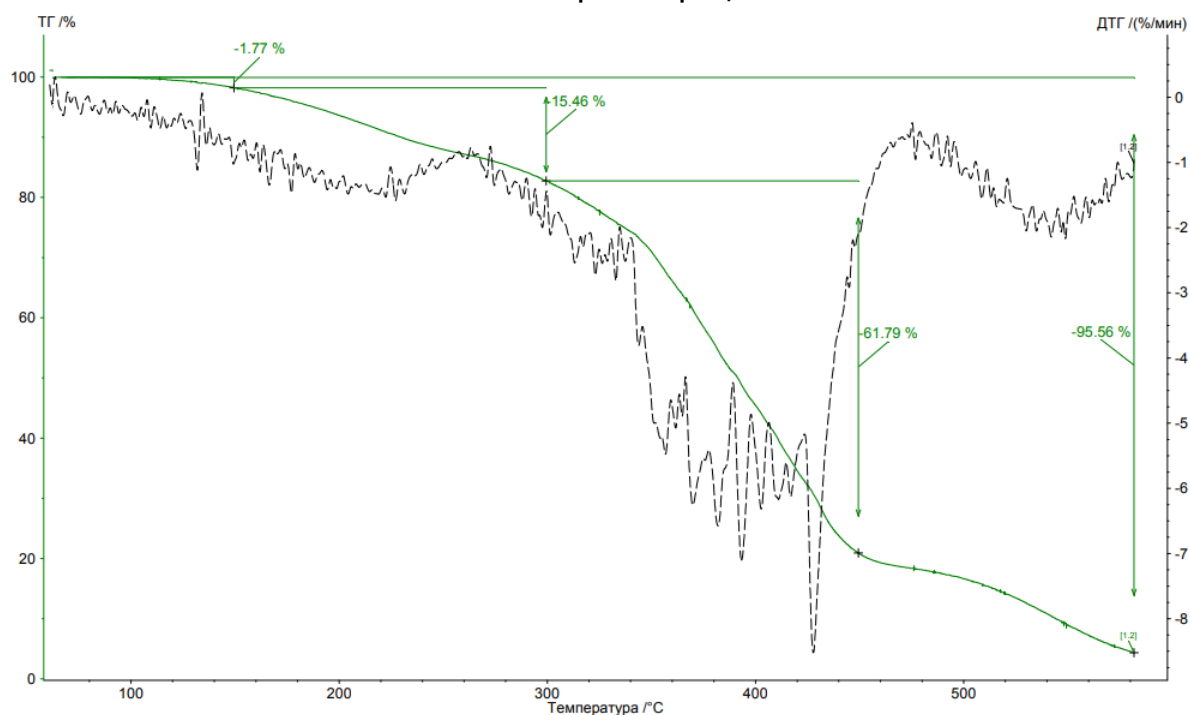


Рис. 8. ТГ кривая образца 2

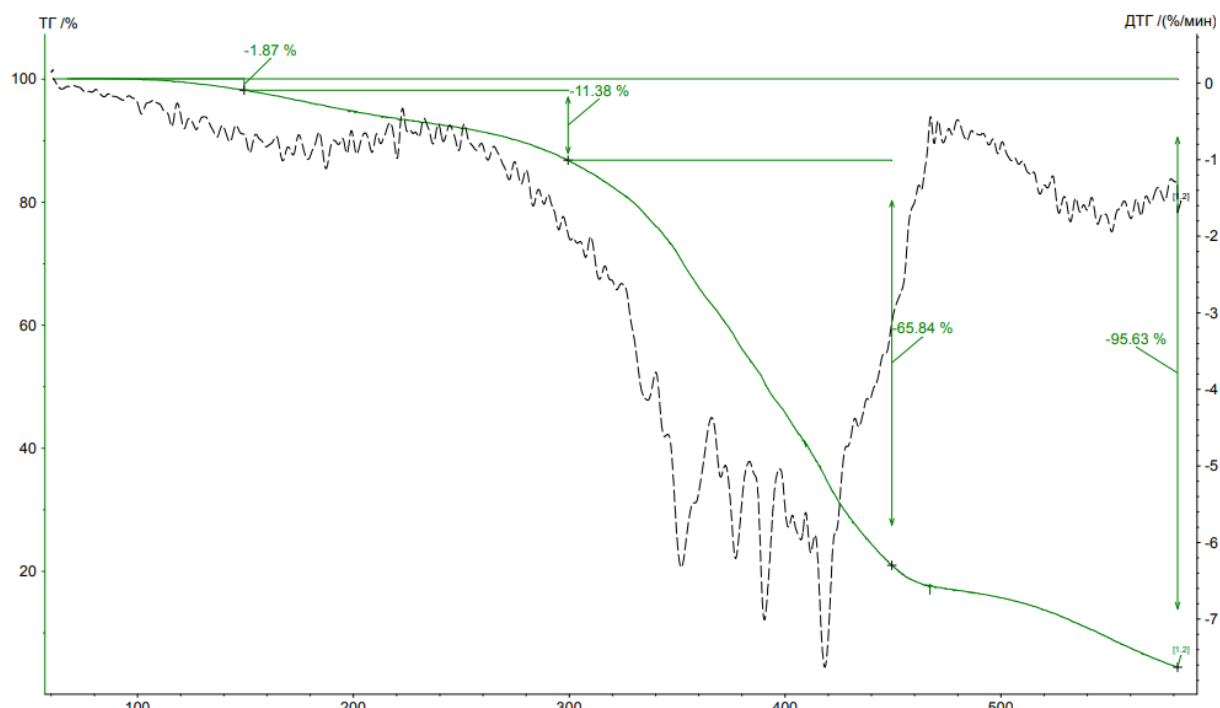


Рис. 9. ТГ кривая образца 3

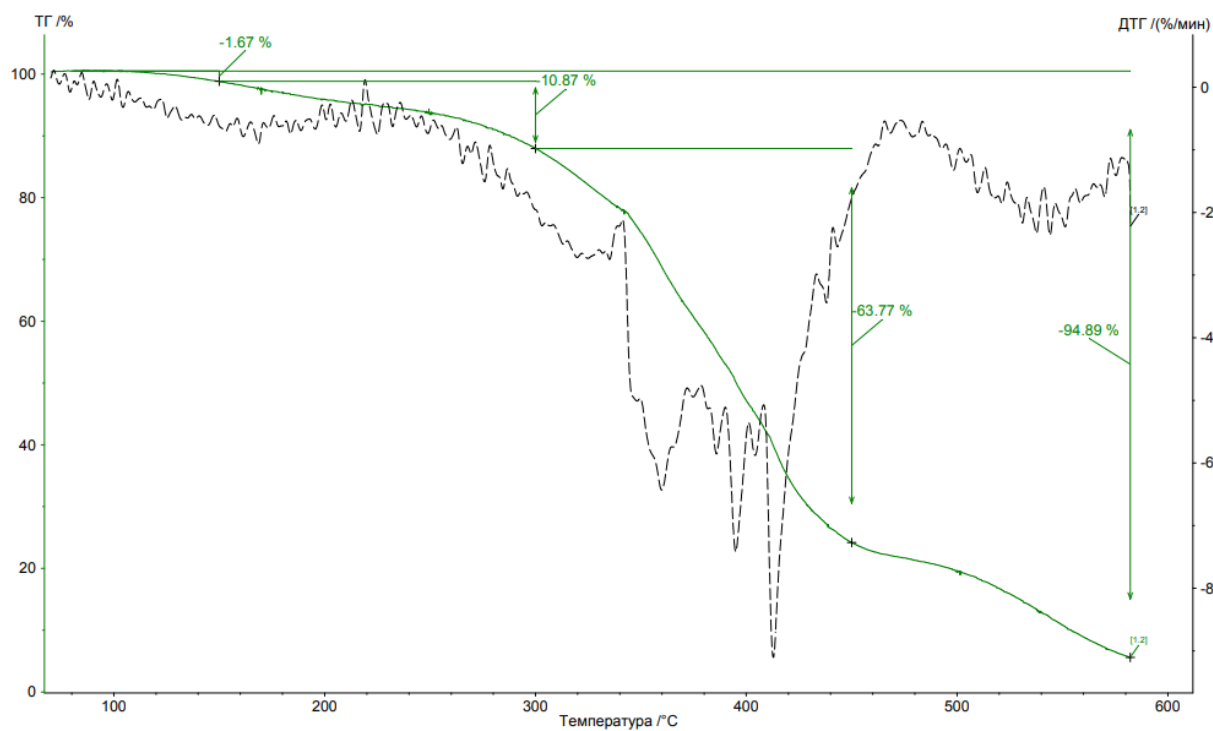


Рис. 10. ТГ кривая образца 4

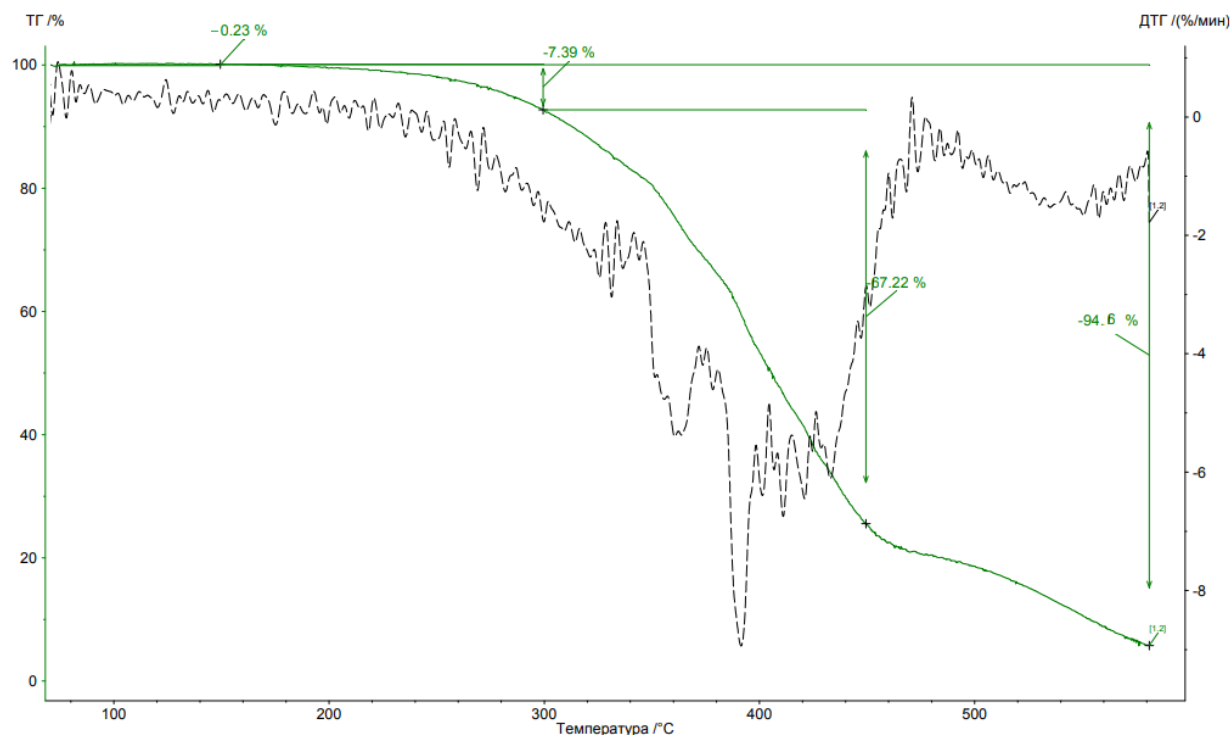


Рис. 11. ТГ кривая образца 5

Результаты по исследованию смачивания водой полученных полимерных пленок показали, что с увеличением температурного режима обработки пленок смачивание пленок водой значительно ухудшается. Растекания воды не наблюдается даже в случае образца, полученного при холодном отверждении.

Заключение

Для разработанного состава композиции не характерна максимальная степень отверждения в условиях холодного отверждения. Введение полиэфира на основе себадиновой кислоты, имеющего в структуре свободные гидроксильные группы, требует нагрева для обеспечения максимально сшитого сополимера. Соответственно, температурная обработка композита однозначно способствует повышению уровня физико-механических и эксплуатационных характеристик. Также с целью снижения количества золь фракции необходимо изменение количества сшивающего агента – отвердителя и необходимо повышение температурного режима отверждения.

Список источников

1. Verma C., Olasunkanmi L.O., Akpan. et al. // *Reactive and Functional Polymers*. 2020. V. 156. P. 104741. DOI: 10.3390/surfaces7020024.
2. Rahman M.M., Akhtarul I.M. // *Polymer Bulletin*. 2022. V. 79. P. 1949. DOI: 10.1007/s00289-021-03577-1.
3. Shundo A., Yamamoto S., Tanaka K. // *Jacs Au*. 2022. V. 2. P. 1522. DOI: 10.1021/jacsau.2c00120.
4. Mi X., Liang N., Xu. et al. // *Progress in Materials Science*. 2022. V. 130. P. 100977. DOI: 10.3390/en15176235.
5. Jyotishkumar P., Harikrishnan P., Sanjay M.R. *Epoxy Composites: Fabrication. Characterization and Applications*. 2021. 448 p. DOI: 10.1002/9783527824083.
6. Park J.K., Kim M.O. // *Journal of Building Engineering*. 2021. V. 38. P. 1022223. DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.102223.
7. Zanghellini B., Knaack P., Schörpf S. et al. // *Polymers*. 2021. V. 13, No. 2. P. 308. DOI: 10.3390/polym13020308.
8. Dallaev R., Pisarenko T., Papež N. // *Polymers*. 2023. V. 15. P. 3964. DOI: 10.3390/polym15193964.
9. Rudawska A., Frigione M. // *Polymers*. 2022. V. 14. P. 2277. DOI: 10.3390/polym14112277

10. Heck C.T., Volkmann G., Woodward H.N. // Peer J. 2020. V. 8. P. 10495 DOI: 10.7717/peerj.10495
11. Makhmetova A., Negim E.S., Ainakulova D. et al. // Complex use of mineral resources. 2024. V. 328, No. 1. P. 20. DOI: 10.31643/2024/6445.03
12. Baron C., Donadio F., Scherdel M. et al. // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2024. V. 238, No. 7. DOI: 10.1177/09544062241245552
13. Латицкий В.А., Крицук А.А. Физико-механические свойства эпоксидных полимеров и стеклопластиков. Киев: Наук. думка. 1986. 96 с.
14. Higgins C., Cahill J., Jolanki R., Nixon R.. Polyester Resins. In: John S., Johansen J., Rustemeyer T., Elsner P., Maibach H. (eds) Kanerva's Occupational Dermatology. 2020. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-68617-2_54
15. Ramakrishnan T., Mohan Gift. M.D., Chitradevi S. et al. // Advances in Materials Science and Engineering. 2022. V. 1. P. 1088926. DOI: 10.1155/2022/1088926
16. Nodehi M. // Innovative Infrastructure Solutions. 2022. V. 7, No. 1. P. 64. DOI: 10.1007/s41062-021-00661-3
17. Petrova A.P., Isaev A.Y., Smirnov O.I. et al. // Polymer Science. Series D. 2023. V. 16, No. 4. P. 799. DOI: 10.1134/S1995421223040251
18. Savotchenko S., Kovaleva E. // Modern Physics Letters B. 2021. V. 35. P. 2150445. DOI: 10.1142/S0217984921504455
19. Tkachuk A.I., Zagora A.G., Terekhov I.V. et al. // Polymer Science. Series D. 2022. V. 15, No. 2. P. 171. DOI: 10.1134/S1995421222020289
20. Rakhmatullina A.P., Satbaeva N.S., Cherezova E.N. et al. // Russ J Appl Chem. 2020. V. 93. P. 182. DOI: 10.1134/S1070427220020044
21. Aziz T., Haq F., Farid A. et al. // Carbon Letters. 2024. V. 34, No. 1. P. 477. DOI: 10.1007/s42823-023-00547-7
22. Li J., Aung H.H., Du B. // Molecules. 2023. V. 28, No. 2. P. 547. DOI: 10.3390/molecules28020547
23. Müller-Pabel M., Agudo J.A.R., Gude M. // Polymer Testing. 2022. V. 114. P. 107701. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2022.107701
24. Hoshino T., Okamoto Y., Yamamoto A. et al. // Scientific reports. 2021. V. 11, No. 1. P. 9767. DOI: 10.1038/s41598-021-89155-x
25. Yu Z., Ma S., Tang Z. et al. // Green Chemistry. 2021. V. 23, No. 17. P. 6566. DOI: 10.1039/D1GC02126E
26. Zhao H., Xu S., Guo A. et al. // Thermochimica Acta. 2021. V. 702. P. 178987. DOI: 10.1016/j.tca.2021.178987
27. Chen B., Zhang Q., Lu M. et al. // J Appl Polym Sci. 2021. V.138, No. 23. P. 50523. DOI: 10.1002/app.50523
28. Aziz T., Farid A., Haq F. et al. // Environ Res. 2023. V.222. P. 115253. DOI: 10.1016/j.envres.2023.115253
29. Nguyen T.K.L., Soares B.G., Duchet-Rumeau J. et al. // Compos Sci Technol. 2017. V. 140. P. 30. DOI: 10.1016/j.compscitech.2016.12.021

Вихарева Ирина Николаевна – кандидат химических наук, заместитель директора научно-образовательного центра «Нанотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: vikharevain@susu.ru

Кручинина Полина Александровна – магистрант кафедры экологии и химической технологии, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: kruchininap01@gmail.com

Николаев Дмитрий Валерьянович – бакалавр кафедры экологии и химической технологии, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: Dimanik.kolaev@yandex.ru

Шарапова Ирина Тагировна – бакалавр кафедры экологии и химической технологии, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: itsevervess@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 24 октября 2024 г.
The article was submitted 24 October 2024.*