

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНЕЗИТА НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ

© А. З. Бекешев¹, А. С. Мостовой², Ю. А. Кадыкова²

¹ Актюбинский региональный государственный университет им. К. Жубанова, 030000, Казахстан, г. Актобе, пр. Алии Молдагуловой, д. 34

² Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77
E-mail: Mostovoy19@rambler.ru

Поступила в Редакцию 9 ноября 2020 г.

После доработки 20 февраля 2021 г.

Принята к публикации 9 марта 2021 г.

Доказана эффективность использования магнезита в качестве активного наполнителя эпоксидного полимера, обеспечивающего повышение прочности и изменение физико-химических свойств эпоксидных композитов. Выбрано оптимальное содержание магнезита как структурирующей добавки и как наполнителя в составе эпоксидной композиции (0.1 и 100 мас. ч.), при котором магнезит упрочняет эпоксидный композит. Установлено, что введение магнезита в эпоксидный композит приводит к повышению теплостойкости по Вика со 132 до 148–216°C, повышает термостойкость эпоксидного композита, что проявляется в смещении начальной температуры деструкции в область более высоких температур. Кроме того, при термической деструкции композита повышается выход карбонизованных структур (с 54 до 70–83 мас%), препятствующих выделению летучих продуктов пиролиза в газовую фазу, что приводит к снижению горючести эпоксидного композита.

Ключевые слова: эпоксидный олигомер; модификация; пластификатор; наполнитель; магнезит; физико-химические и механические свойства

DOI: 10.31857/S0044461821050157

Комбинирование или физико-химическая модификация различных материалов, входящих в состав эпоксидных композиций, позволяет направленно регулировать важнейшие свойства эпоксидных композитов. Введение пластификаторов обеспечивает эластичность полимерных материалов и может изменять их температуру стеклования [1–4]. Введение наполнителей обеспечивает повышение прочности эпоксидных композитов, а также придание им специфических физико-химических свойств. Влияние введения наполнителя на свойства полимера определяется многими факторами: химической природой полимера и наполнителя, характером поверхности наполнителя, размером и формой его частиц, способностью к образованию собственных структур, изменением конформационного набора макромолекул и самой структуры полимера. Вводимые наполнители с различным количественным содержанием по-разному

влияют на структуру полимеров [5–8]. Исследование механизма протекания физико-химических процессов сшивания при введении в эпоксидное связующее различных пластификаторов и наполнителей является актуальной задачей современного материаловедения.

Несмотря на большое число работ, которые посвящены модификации эпоксидных композитов, в настоящее время по-прежнему остаются недостаточно изученными вопросы, связанные с влиянием различных наполнителей и пластификаторов на процессы структурообразования, структуру и эксплуатационные характеристики полимерных композиционных материалов.

Цель работы — изучение влияния модификатора полифункционального действия олиго(резорцинфенилфосфата) с концевыми фенильными группами Fylolflex и дисперсного минерального наполнителя магнезита на физико-химические и деформацион-

но-прочностные свойства композитов на основе эпоксидной смолы.

Экспериментальная часть

Разрабатывали составы на основе эпоксидной диановой смолы марки ЭД-20 (ГОСТ 10587–93 «Смолы эпоксидно-диановые неотвержденные. Технические условия», АО «ХИМЭКС Лимитед»). В качестве отвердителя эпоксидного олигомера применялся отвердитель аминного типа — полиэтиленполиамин (ПЭПА) (ТУ 6-02-594–85 «Полиэтиленполиамины технические. Технические условия», АО «ХИМЭКС Лимитед»), способный формировать трехмерную сетчатую структуру без нагрева.

Для пластификации эпоксидных композитов в работе использовали олиго(резорцинфенилфосфат) с концевыми фенильными группами Fylolflex (ОРФФ) (ICL Industrial Products America Inc.) со степенью чистоты 99%.

ОРФФ — олигомерный безгалогенный пластификатор, разработанный для использования в качестве антипирена для конструкционных полимеров, таких как модифицированный полифениленоксид и сополимеры поликарбоната. По сравнению с другими безгалогенными (фосфатными) антипиренами обладает низкой летучестью и стабильностью (начало термической деструкции при $+300^{\circ}\text{C}$), что обеспечивает возможность его применения для модификации большинства технических пластиков. Преимущество ОРФФ перед другими бисфосфатами заключается в более низкой вязкости, что облегчает обращение с продуктом и улучшает его технологические свойства (более низкая температура смешивания) [4, 5].

Выбор ОРФФ обусловлен наличием в его составе ингибитора горения — фосфора (10.7%), который структурирует эпоксидный полимер при воздействии на него повышенных температур и обеспечивает увеличение выхода карбонизованных структур, которые в свою очередь являются физическим барьером для взаимодиффузии горючих газов и окислителя в зону горения, что снижает горючесть эпоксидного композита [4, 5].

Большие потенциальные возможности улучшения характеристик композиционных материалов заложены в использовании как пластификаторов, так и недорогих и эффективных наполнителей [2, 5–8], в число которых входят дисперсные минеральные наполнители, в частности измельченный магнезит. Использовали магнезит Приорского месторождения (Новороссийский район Актюбинской области, Казахстан) с частицами размером ≤ 40 мкм.

В пластифицированный ОРФФ эпоксидный состав магнезит вводился в качестве модифицирующей добавки (0.05–0.50 мас. ч.) и наполнителя (50–150 мас. ч.). Для повышения равномерности распределения и препятствия агрегации частиц магнезита применялась ультразвуковая обработка состава на ультразвуковом диспергаторе УЗДН-2Т. Параметры ультразвукового воздействия: частота 22 ± 2 кГц, продолжительность 60 мин [5].

Отверждение эпоксидной композиции осуществляли при комнатной температуре в течение 24 ± 1 ч с последующей ступенчатой термообработкой при $90 \pm 5^{\circ}\text{C}$ — 2 ч, $120 \pm 5^{\circ}\text{C}$ — 2 ч [4, 5].

В качестве полимерной матрицы использован ранее разработанный состав, состоящий из 100 мас. ч. эпоксидной смолы марки ЭД-20, 40 мас. ч. — ОРФФ и 15 мас. ч. отвердителя — полиэтиленполиамин [4].

В работе исследования выполнены с применением следующих методов: определение изгибающего напряжения и модуля упругости при изгибе — ISO 178:2010; определение прочности и модуля упругости при растяжении — ISO 527-2:2012, определение прочности при сжатии — ISO 604:2002, определение ударной вязкости — ISO 179-1:2010, определение теплостойкости по Вика — ISO 306:2004. Изменение массы, скорости изменения массы и величин тепловых эффектов при нагреве образцов изучали с применением метода термогравиметрического анализа с использованием дериватографа марки Q-1500D (MOM, Венгрия), условия эксперимента: навеска — 100 мг, среда — воздух, интервал нагрева — до 1000°C , скорость нагрева — 10 град·мин $^{-1}$, относительная ошибка не превышает 1%. Исследование морфологии поверхности образцов проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA 3 SBH. Определение теплопроводности и термического сопротивления проводили на приборе ИТП-МГ4 «100» (ISO 22007-2: 2015), рентгенофазовый анализ — на дифрактометре ARL X'TRA. Распределение частиц по размерам определяли методом лазерной дифракции на анализаторе Fritsch Analysette-22 Nanotech в диапазоне 0.01–1000 мкм, дисперсионной средой являлась вода. Определение температуры саморазогрева образца при отверждении эпоксидной композиции проводили по методике, описанной в [9].

Обсуждение результатов

Магнезит преимущественно состоит из карбоната магния и оксидов кальция и кремния, а также содержит небольшое количество оксидов железа(III), меди(II) и никеля(II) (табл 1). Фракционный состав

магнезита представлен частицами от 0.1 до 100 мкм, средние размеры частиц 2–3 и 35–45 мкм (рис. 1), удельная поверхность частиц магнезита составляет $11.2 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$.

Применение ультразвуковой обработки изменяет фракционный состав магнезита. Отмечено увеличение количества частиц с меньшими размерами в сравнении с немодифицированным магнезитом (рис. 2).

По данным РФА, тонкоизмельченный природный магнезит представлен одной основной фазовой структурой, характерной для магнезита (рис. 3). Кристаллы магнезита уплощенные, таблитчатые до чешуйчатых или пластинчатых (рис. 4).

Значение удельной поверхности частиц магнезита после ультразвукового диспергирования, определенное на анализаторе удельной поверхности и пористости Quantachrome Nova 2200 с использованием метода низкотемпературной адсорбции азота, составляет $14.2 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$.

Таблица 1

Химический состав магнезита

Компонент	Концентрация, %
MgCO ₃	66.45
CaO	15.12
SiO ₂	9.47
CuO	3.84
NiO	2.16
Fe ₂ O ₃	2.09
S	0.49
P	0.38

Таким образом, результаты анализа структуры, фракционного, химического, фазового состава и удельной поверхности тонкоизмельченного магнезита показали, что магнезит может быть использован в качестве наполнителя для эпоксидных композитов,

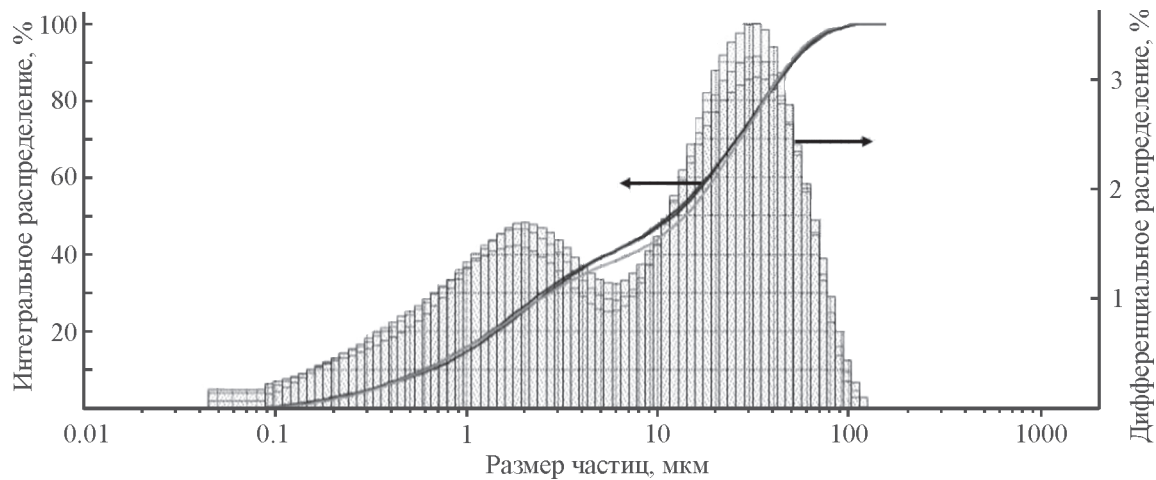


Рис. 1. Фракционный состав магнезита.

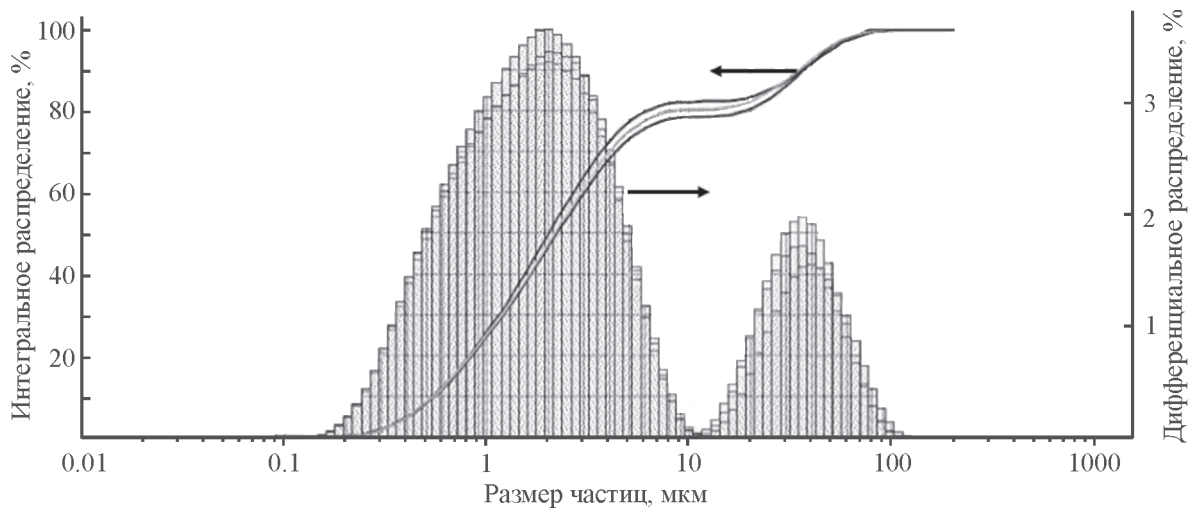


Рис. 2. Фракционный состав магнезита после ультразвукового диспергирования.

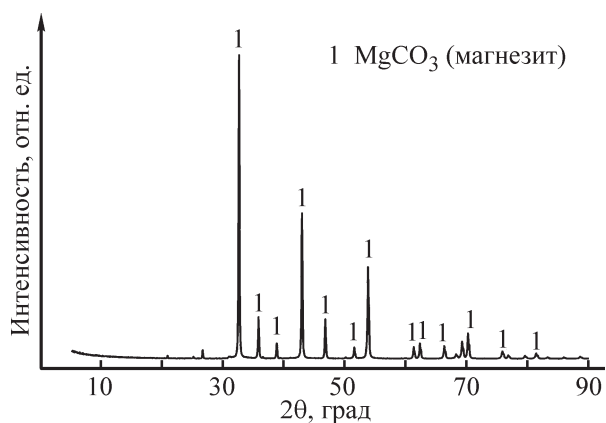


Рис. 3. Данные рентгенофазового анализа магнезита.

который должен обеспечить повышение прочности и улучшение физико-химических свойств полимерных композитов.

Наиболее оптимальным содержанием магнезита в качестве модифицирующей добавки является 0.1 мас. ч., так как при этом достигаются максимальные физико-механические характеристики эпоксидных композитов: на 84% возрастает изгибающее напряжение и на 62% — модуль упругости при изгибе, в 2.3 раза возрастает прочность и на 39% модуль упругости при растяжении, в 2.5 раза возрастает ударная вязкость (табл. 2).

Для снижения себестоимости продукции эффективно введение магнезита как наполнителя эпок-

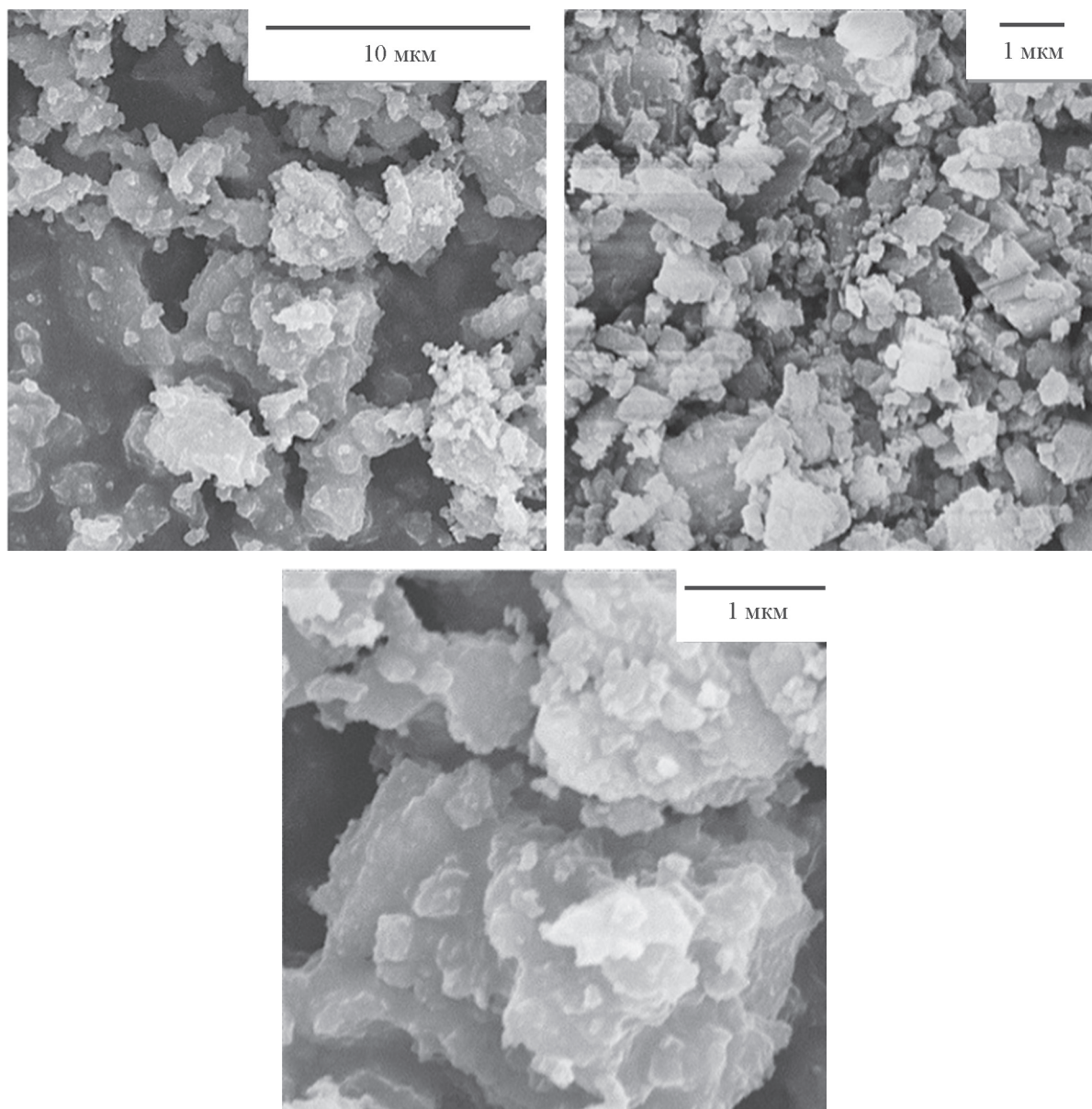


Рис. 4. Данные сканирующей электронной микроскопии магнезита.

Таблица 2
Свойства эпоксидных композитов

Состав композиции, мас. ч., отвержденной 15 мас. ч. ПЭПА	Изгибающее напряжение, МПа	Модуль упругости при изгибе, МПа	Прочность при растяжении, МПа	Модуль упругости при растяжении, МПа	Ударная вязкость, кДж·м ⁻²
100 ЭД-20 + 40 ОРФФ	80	2210	30	1896	6
100 ЭД-20 + 40 ОРФФ + 0.05 магнезит	123	3505	64	2485	9
100 ЭД-20 + 40 ОРФФ + 0.1 магнезит	147	3573	68	2637	15
100 ЭД-20 + 40 ОРФФ + 0.5 магнезит	139	4456	62	2971	10
100 ЭД-20 + 40 ОРФФ + 50 магнезит	94	7428	48	3540	7
100 ЭД-20 + 40 ОРФФ + 100 магнезит	98	9469	37	4498	7
100 ЭД-20 + 40 ОРФФ + 150 магнезит	90	11825	30	5261	6

Примечание. ЭД-20 — эпоксидная диановая смола, ОРФФ — олиго(резорцинфенилфосфат) с концевыми фенильными группами Fylolflex, ПЭПА — полиэтиленполиамин.

сидного композита (100 мас. ч.), при этом на 22% возрастает изгибающее напряжение и в 4.3 раза повышается модуль упругости при изгибе, на 23% возрастает прочность и в 2.4 раза — модуль упругости при растяжении, при этом удается сохранить ударную вязкость на уровне ненаполненного пластифицированного композита (табл. 2).

Излом композита без наполнителя имеет довольно гладкую поверхность разрушения (рис. 5, а), что говорит о низкой способности эпоксидного полимера к трещиностойкости [10]. Введение в состав эпоксидной композиции магнезита сказывается на морфологии матрицы — появляются слоистые структуры, образованные частицами наполнителя. Под

действием ультразвука удается равномерно распределить наполнитель в составе эпоксидной композиции и избежать его агрегации (рис. 5, б).

При оценке влияния наполнителя на сетчатые полимеры необходимо учитывать, что процесс отверждения происходит в присутствии твердого наполнителя с развитой поверхностью, способного влиять на кинетические характеристики реакции полимеризации при отверждении, а также на процессы формирования фазовой структуры материала. Велика также роль адсорбционного взаимодействия компонентов олигомерного состава с твердой поверхностью наполнителя [5, 11–13].

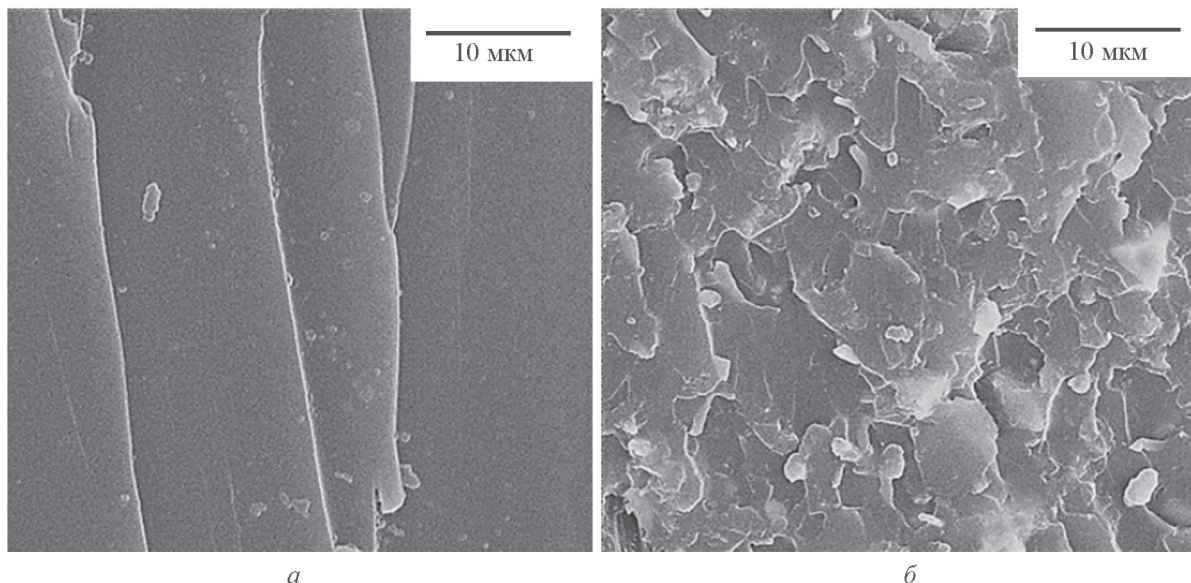


Рис. 5. Данные сканирующей электронной микроскопии образцов эпоксидных композитов. Состав (мас. ч.): а — 100 эпоксидная диановая смола ЭД-20 + 40 олиго(резорцинфенилфосфат) с концевыми фенильными группами Fylolflex + 15 полиэтиленполиамин; б — 100 эпоксидная диановая смола ЭД-20 + 40 олиго(резорцинфенилфосфат) с концевыми фенильными группами Fylolflex + 100 магнезит + 15 полиэтиленполиамин.

Анализ кинетики отверждения эпоксидных композиций показал, что введение магнезита оказывает иницирующее влияние на процессы структурообразования (рис. 6), что проявляется в сокращении продолжительности гелеобразования с 27 до 17–19 мин и продолжительности отверждения с 38 до 27 мин (для композиции с содержанием магнезита 0.1 мас. ч.). При этом продолжительность отверждения при содержании магнезита 100 мас. ч. незначительно увеличивается, что, по-видимому, связано с высокой вязкостью композиции и стерическими затруднениями процесса отверждения (табл. 3). Кроме того, введение в эпоксидную композицию магнезита обеспечивает повышение степени отверждения эпоксидного композита с 90.0 до 92.2–97.5%. Это позволяет предположить, что частицы магнезита являются дополнительными центрами сшивки.

Введение магнезита в эпоксидную композицию приводит к повышению теплостойкости по Вика эпоксидного композита со 132 до 148–216°C (табл. 4), обеспечивает повышение термостойкости композита, что проявляется в смещении начальной температуры основной стадии деструкции в область более высоких температур (с 230 до 245–255°C). Кроме того, при термической деструкции композита отмечено повышение выхода карбонизованных структур с 54 до 70–

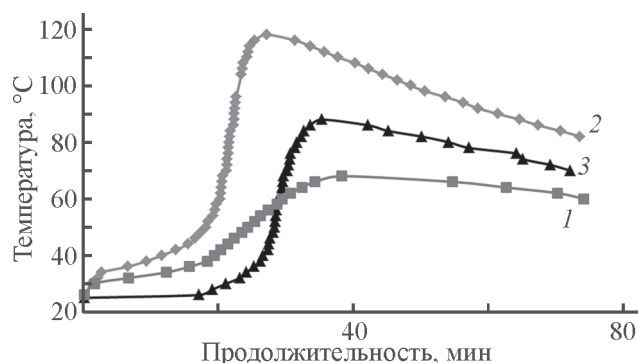


Рис. 6. Кинетические кривые отверждения эпоксидных композиций.

1 — 100 эпоксидная диановая смола ЭД-20 + 40 олиго(резорцинфенилфосфат) с концевыми фенильными группами Fylolflex + 15 полиэтиленполиамин, 2 — 100 эпоксидная диановая смола ЭД-20 + 40 олиго(резорцинфенилфосфат) с концевыми фенильными группами Fylolflex + 0.1 Магнезит + 15 полиэтиленполиамин, 3 — 100 эпоксидная диановая смола ЭД-20 + 40 олиго(резорцинфенилфосфат) с концевыми фенильными группами Fylolflex + 100 Магнезит + 15 полиэтиленполиамин.

83%, препятствующих выделению летучих продуктов пиролиза в газовую фазу, что обеспечивает снижение горючести эпоксидного композита — кислородный индекс повышается с 28 до 38 об% (табл. 4).

Таблица 3

Значения показателей отверждения эпоксидных композиций

Состав композиции, мас. ч., отвержденной 15 мас. ч. ПЭПА	Продолжительность гелеобразования, мин	Продолжительность отверждения, мин	Максимальная температура отверждения, °C	Степень отверждения, %
100 ЭД-20 + 40 ОРФФ	27	38	88	90.0
100 ЭД-20 + 40 ОРФФ + 0.1 магнезит	17	27	118	92.2
100 ЭД-20 + 40 ОРФФ + 100 магнезит	19	38	68	97.5

Примечание. ЭД-20 — эпоксидная диановая смола, ОРФФ — олиго(резорцинфенилфосфат) с концевыми фенильными группами Fylolflex, ПЭПА — полиэтиленполиамин.

Таблица 4

Физико-химические свойства эпоксидных композитов

Состав композиции, мас. ч., отвержденной 15 мас. ч. ПЭПА	Температурный интервал основной стадии термоллиза, °C	Выход карбонизованных структур при T_k , мас%	Теплостойкость по Вика, °C	Кислородный индекс, об%
100 ЭД-20	200–390	40 (390°C)	86	19
100 ЭД-20 + 40 ОРФФ	230–370	54 (370°C)	132	28
100 ЭД-20 + 40 ОРФФ + 0.1 магнезит	235–370	55 (370°C)	148	29
100 ЭД-20 + 40 ОРФФ + 50 магнезит	245–360	70 (360°C)	174	32
100 ЭД-20 + 40 ОРФФ + 100 магнезит	250–350	78 (350°C)	192	36
100 ЭД-20 + 40 ОРФФ + 150 магнезит	255–360	83 (360°C)	216	38

Примечание. ЭД-20 — эпоксидная диановая смола, ОРФФ — олиго(резорцинфенилфосфат) с концевыми фенильными группами Fylolflex, ПЭПА — полиэтиленполиамин; T_k — конечная температура основной стадии термоллиза.

Таблица 5

Влияние введения магнезита на теплопроводность и термическое сопротивление эпоксидных композиций

Состав композиции, мас. ч., отвержденной 15 мас. ч. ПЭПА	Коэффициент теплопроводности, Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹	Термическое сопротивление, м ² ·К ⁻¹ ·Вт ⁻¹
100 ЭД-20 + 40 ОРФФ	0.177 ± 0.0053	0.077 ± 0.0023
100 ЭД-20 + 40 ОРФФ + 100 магнезит	0.233 ± 0.0115	0.030 ± 0.0016
100 ЭД-20 + 40 ОРФФ + 150 магнезит	0.282 ± 0.0140	0.026 ± 0.0011

Примечание. ЭД-20 — эпоксидная диановая смола, ОРФФ — олиго(резорцинфенилфосфат) с концевыми фенильными группами Fylolflex, ПЭПА — полиэтиленполиамин.

Разработанные составы, наполненные магнезитом, не поддерживают горение на воздухе и относятся к классу трудновоспламеняемых материалов.

Теплопроводность полимерных композитов, применяемых в электротехническом и электронном оборудовании, является важной характеристикой. В большинстве случаев эпоксидные смолы обладают относительно малой теплопроводностью (~0.1 Вт·м⁻¹·К⁻¹). Следовательно, когда появляются местные нагревы, эпоксидные материалы работают как тепловая изоляция, что ведет к повышению рабочей температуры. Поэтому в зависимости от конструкций требуется применение компонентов с более высокой термостойкостью или использование специальных теплоотводов для рассеивания тепла [9, 14].

Введение магнезита в эпоксидную композицию обеспечивает возрастание коэффициента теплопроводности на 32–59%, при этом отмечено снижение термического сопротивления (табл. 5).

Выводы

Результаты анализа структуры, фракционного, химического, фазового состава и удельной поверхности тонкоизмельченного магнезита показали, что магнезит может быть использован в качестве усиливающего наполнителя для эпоксидных композитов.

Введение магнезита в эпоксидную композицию инициирует процессы структурообразования эпоксидного композита, что проявляется в сокращении продолжительности гелеобразования и отверждения (для композиции с содержанием магнезита 0.1 мас. ч.). При этом продолжительность отверждения при содержании магнезита 100 мас. ч. значительно увеличивается, что, по-видимому, связано с высокой вязкостью композиции и стерическими затруднениями процесса отверждения. Кроме того, введение в эпоксидную композицию магнезита обеспечивает повышение степени отверждения эпоксидного композита. Это позволяет предположить,

что частицы магнезита являются дополнительными центрами сшивки.

Введение магнезита в эпоксидный композит обеспечивает повышение теплостойкости и термостойкости композита. При термической деструкции эпоксидного композита, содержащего магнезит, повышается выход карбонизованных структур, препятствующих выделению летучих продуктов пиролиза в газовую фазу, что обеспечивает снижение горючести эпоксидного композита. Разработанные составы, наполненные магнезитом, не поддерживают горение на воздухе и относятся к классу трудновоспламеняемых материалов.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (ИРН AP08955736 и ИРН AP05133460).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация о вкладе авторов

Ю. А. Кадыкова и А. З. Бекешев исследовали свойства магнезита; А. С. Мостовой разработал составы эпоксидных композитов, модифицированных тонкоизмельченным магнезитом, и провел исследование их физико-химических и механических характеристик.

Информация об авторах

Бекешев Амирбек Зарлыкович, к.ф.-м.н., ассоциированный профессор кафедры «Физика», «Актюбинский региональный университет им. К. Жубанова», ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7038-4631>

Мостовой Антон Станиславович, к.т.н., и.о. заведующего кафедрой «Естественные и математические науки», заведующий лабораторией «Современные

методы исследования функциональных материалов и систем», ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.», ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2828-9988>

Кадыкова Юлия Александровна, д.т.н., профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника», ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5581-0970>

Список литературы

- [1] Buketov A. V., Sapronov A. A., Buketova N. N., Brailo M. V., Marushak P. O., Panin S. V., Amelin M. Yu. Impact toughness of nanocomposite materials filled with fullerene C60 particles // *Comp. Mech. Comput. Appl.* 2018. N 9. P. 141–161. <https://doi.org/10.1615/CompMechComputApplIntJ.v9.i2.30>
- [2] Buketov A. V., Sapronov O. O., Brailo M. V., Maruschak P. O., Yakushchenko S. V., Panin S. V., Nigalatiy V. D. Dynamics of destruction of epoxy composites filled with ultra-dispersed diamond under impact conditions // *Mech. Adv. Mater. Struc.* 2020. V. 27. N 9. P. 725–733. <https://doi.org/10.1080/15376494.2018.1495788>
- [3] Садыгов Ш. Ф., Ищенко Н. Я., Агаева С. А. Модификация ЭД-20 глицидными эфирами некоторых бензойных кислот // *Пласт. массы.* 2008. № 3. С. 24–26.
- [4] Мостовой А. С., Нуртазина А. С., Кадыкова Ю. А., Бекешев А. З. Высокоэффективные пластификаторы-антипирены для эпоксидных полимеров // *Перспектив. материалы.* 2019. № 2. С. 36–43. <https://doi.org/10.30791/1028-978X-2019-2-36-43> [Mostovoy A. S., Nurtazina A. S., Kadykova Yu. A., Bekeshev A. Z. Highly efficient plasticizers-antipirenes for epoxy polymers // *Inorg. Mater. Appl. Res.* 2019. N 10. P. 1135–1139. <https://doi.org/10.1134/S2075113319050228>].
- [5] Мостовой А. С., Нуртазина А. С., Бурмистров И. Н., Кадыкова Ю. А. Исследование влияния тонкоизмельченного хромита на физико-химические и механические свойства модифицированных эпоксидных композитов // *ЖПХ.* 2018. Т. 91. № 11. С. 1549–1558. <https://doi.org/10.1134/S004446181811004X> [Mostovoy A. S., Nurtazina A. S., Burmistrov I. N., Kadykova Y. A. Effect of finely dispersed chromite on the physicochemical and mechanical properties of modified epoxy composites // *Russ. J. Appl. Chem.* 2018. V. 91. N 11. P. 1758–1766. <https://doi.org/10.1134/S1070427218110046>].
- [6] Buketov A. V., Dolgov N. A., Sapronov A. A., Nigalatii V. D., Babich N. V. Mechanical characteristics of epoxy nanocomposite coatings with ultradisperse diamond particles // *Strength of Materials.* 2017. V. 49. P. 464–471. <https://doi.org/10.1007/s11223-017-9888-y>
- [7] Старокадомский Д. Л. Эпоксидные композиты с 10 и 50 мас% микронаножиелеза: прочность, микроструктура, химическая и термическая стойкость // *ЖПХ.* 2017. Т. 90. № 8. С. 1074–1082 [Starokadomskii D. L. Epoxy composites with 10 and 50 wt% micronanoiron: Strength, microstructure, and chemical and thermal resistance // *Russ. J. Appl. Chem.* 2017. V. 90. N 8. P. 1337–1345. <https://doi.org/10.1134/S1070427217080249>].
- [8] Pati P. R., Satpathy M. P. Investigation on red brick dust filled epoxy composites using ant lion optimization approach // *Polym. Compos.* 2019. V. 40. N 10. P. 3877–3885. <https://doi.org/10.1002/pc.25246>
- [9] Ширишова Е. С., Татаринцева Е. А., Плакунова Е. В., Панова Л. Г. Изучение влияния модификаторов на свойства эпоксидных композиций // *Пласт. массы.* 2006. № 12. С. 34–36.
- [10] Zhang Q., Bai G., Xiao W., Sui G., Yang X. Effect of amine functionalized MWCNT-epoxy interfacial interaction on MWCNT dispersion and mechanical properties of epoxy-amine composites // *Polym. Compos.* 2018. V. 39. P. E2552-E2561. <https://doi.org/10.1002/pc.24832>
- [11] Бурмистров И. Н., Мостовой А. С., Шатрова Н. В., Панова Л. Г., Кузнецов Д. В., Гороховский А. В., Ильиных И. А. Влияние модификации поверхности полититанатов калия на механические свойства полимерных композиционных материалов на их основе // *ЖПХ.* 2013. Т. 86. № 5. С. 818–824 [Burmistrov I. N., Mostovoi A. S., Shatrova N. V., Panova L. G., Kuznetsov D. V., Gorokhovskii A. V., Ilinykh I. A. Influence of surface modification of potassium polytitanates on the mechanical properties of polymer composites thereof // *Russ. J. Appl. Chem.* 2013. V. 86. N 5. P. 765–771. <https://doi.org/10.1134/S107042721305025X>].
- [12] Tikhani F., Moghari S., Jouyandeh M., Laoutid F., Vahabi H., Saeb M. R., Dubois P. Curing kinetics and thermal stability of epoxy composites containing newly obtained nano-scale aluminum hypophosphite (AlPO₂) // *Polymers.* 2020. V. 12. ID 644. <https://doi.org/10.3390/polym12030644>
- [13] Sul J.-H., Prusty B. G., Crosky A. Effect of the addition of multi-walled carbon nanotubes on the thermomechanical properties of epoxy resin // *Polym. Compos.* 2017. V. 38. P. 1873–1880. <https://doi.org/10.1002/pc.23757>
- [14] Chen J., Liu B., Yan L. Nanoscale thermal transport in epoxy matrix composite materials reinforced with carbon nanotubes and graphene nanoplatelets // *J. Nanopart. Res.* 2019. V. 21. N 11. ID 256. <https://doi.org/10.1007/s11051-019-4707-y>