

ISSN 1561-8331 (Print)

ISSN 2524-2342 (Online)

УДК 667.621.63+667.622.51

<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2020-56-2-220-228>

Поступила в редакцию 26.04.2019

Received 26.04.2019

В. В. Комарь, Т. А. Походина, Н. В. Кулинич, Н. П. Крутько, Л. В. Овсенко

Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

МОДИФИКАЦИЯ ПОРОШКОВЫХ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫМ ОКСИДОМ МАГНИЯ

Аннотация. Исследован процесс формирования эпоксидных порошковых композиций с участием высокодисперсного оксида магния при получении композиций методом экструзионного смешения компонентов в расплаве. Установлено, что высокодисперсные частицы MgO участвуют в процессе полимеризации и выступают как дополнительные узлы шивки дефектных областей полимерной сетки, что улучшает функциональные свойства порошковых эпоксидных композиций. Покрытия на основе модифицированных композиций характеризуются высокими физико-механическими показателями при низкотемпературном отверждении (130 °C) и могут быть использованы для формирования защитных покрытий на термочувствительных изделиях.

Ключевые слова: порошковые эпоксидные композиции, оксид магния, размер частиц, температура стеклования, физико-механические свойства покрытий

Для цитирования. Модификация порошковых эпоксидных композиций высокодисперсным оксидом магния / В. В. Комарь [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим.наук. – 2020. – Т. 56, № 2. – С. 220–228. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2020-56-2-220-228>

V. V. Komar, T. A. Pochodina, N. V. Kulinich, N. P. Krutko, L. V. Ovseenko

Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

MODIFICATION OF POWDER EPOXY COMPOSITIONS WITH HIGHLY DISPERSED MAGNESIUM OXIDE

Abstract. The process of forming epoxy powder compositions with the participation of highly dispersed magnesium oxide in the preparation of compositions by extrusion mixing of components in the melt is investigated. It is established that highly dispersed MgO particles participate in the polymerization process and act as additional crosslinking units of defective regions of the polymer network, which improves the functional properties of epoxy powder compositions. Coatings based on modified compositions are characterized by high physicomechanical properties at low temperature curing (130 °C) and can be used to form protective coatings on heat-sensitive products.

Keywords: epoxy powder composition, magnesium oxide, particle size, glass transition temperature, physical and mechanical properties of coatings

For citation. Komar V. V., Pochodina T. A., Kulinich N. V., Krutko N. P., Ovseenko L. V. Modification of powder epoxy compositions with highly dispersed magnesium oxide / *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khmichnykh navyk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2020, vol. 56, no. 2, pp. 220–228 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2020-56-2-220-228>

Введение. Из применяемых в настоящее время термореактивных полимерных матриц наиболее высокими прочностными и адгезионными показателями обладают эпоксидные диановые смолы и поэтому их широко используют в качестве основного компонента лакокрасочных материалов (ЛКМ), клеев, герметиков, полимерных композиционных материалов и т. д. В настоящее время в связи с совершенствованием технологий возрастает потребность в современных материалах на основе эпоксидных смол с улучшенными эксплуатационными и технологическими характеристиками. Метод модификации полимеров путем наполнения их тонкодисперсными порошками широко используется для улучшения их физико-механических свойств. Однако объем научных публикаций в отечественной и зарубежной литературе свидетельствует о неослабевающем интересе к данной проблеме. Как известно, использование наночастиц в покрытиях и красках позволяет создавать продукцию с улучшенными или абсолютно новыми свойствами. К таким видам продукции относятся: антибактериальные краски; самоочищающиеся покрытия; покрытия, стойкие к царапанию; прозрачные покрытия с повышенной защитой от УФ-излучения; краски, экранирующие электромагнитное излучение. Однако имеющиеся в литературе данные о приме-

нении наночастиц для модификации ЛКМ в основном касаются модификации жидких ЛКМ [1–4] и в меньшей мере – модификации порошковых ЛКМ. В частности, описаны порошковые ЛКМ, модифицированные силикатными наночастицами [5, 6]. На основании полученных экспериментальных данных авторами показано, что модификация порошковых эпоксидных композиций силикатными наночастицами (в зависимости от концентрации и морфологии наночастиц) приводит к значительному улучшению свойств покрытий. Наблюдается снижение проницаемости по воде в 1,5–3 раза, повышение износостойкости покрытий в 2–6 раз, а также улучшаются термические свойства (коксый остаток увеличивается в 1,5–2,5 раза).

Модификация неорганических наполнителей нанодисперсными частицами оксидов металлов позволяет направленно регулировать их физико-химические, технологические и эксплуатационные свойства композиционных материалов [7, 8]. Эффективность модификации терморезистивных полимеров зависит от следующих характеристик наполнителя: размера и формы частиц, их объемной доли, распределения частиц по размерам, однородности распределения наполнителя по объему системы.

При этом использование поверхностей оксидов с различной кислотностью или основностью позволяет контролировать адгезию матричного эпоксидного полимера на различных поверхностях, варьируя которую можно получить как более жесткие, так и более пластичные композиты. Среди химически активных оксидов, на наш взгляд, представляет интерес оксид магния, результирующая кислотность поверхности которого является сильноосновной и содержит сильные апротонные центры основного типа (рН изоионного состояния составляет 10,2–10,9, в зависимости от метода синтеза) [9, 10]. Значительный интерес к оксиду магния в последние десятилетия вызван его многофункциональностью. Оксиды магния применяются в качестве составной части катализаторов, носителей активной фазы и самостоятельной каталитической системы. Наибольшее распространение они получили как удобные модельные матрицы для химического модифицирования. Несомненно, представляют интерес и антикоррозионные свойства оксида магния [11–12]. Выбор наноксидов магния в качестве модификатора эпоксидного порошкового связующего объясняется также и его коммерческой доступностью и возможностью промышленного получения образцов наполнителя с заданными фракционным составом и свойствами.

Цель данной работы – исследование условий формирования, структуры и свойств покрытий на основе порошковых эпоксидных композиций, модифицированных высокодисперсным оксидом магния.

Материалы и методы испытаний. Для исследования использовали эпоксидные композиции на основе твердого эпоксидного олигомера марки CHS-epoxy 121 (производства Spolchemie со средним молекулярным весом ~1700 г/моль и эпоксидным весовым эквивалентом 800–900 г/экв.). Композиции получали методом экструзионного смешения компонентов в расплаве с использованием двухшнекового экструдера при различных режимах экструдирования. В качестве наполнителя в составе композиций использовали смесь диоксида титана и микробарита, в который дополнительно вводили высокодисперсный оксид магния. В качестве оксида магния использовали оксид магния (n-MgO) производства компании ChemPur (размер первичных частиц 36 нм, форма частиц сферическая, удельная поверхность – 46 м²/г) и лабораторные образцы оксида магния (лаб-MgO), полученные глицин-цитрат-нитратным методом (первичный размер частиц 115 нм [13]).

Гранулометрический состав порошков оксида магния определяли в спиртовых суспензиях предварительно обработанных ультразвуком. Учитывая достаточно высокую полидисперсность порошков оксида магния, размер частиц в диапазоне 0,3–100 мкм определяли на лазерном микроанализаторе размеров частиц «Анализетте 22 компакт» фирмы Fritsch, а в диапазоне 3 нм (в диаметре) – 10000 нм на лазерном анализаторе Zetasizer NS компании Malvern Instruments. Следует отметить, что данные по гранулометрическому составу получены на приборах, основанных на светорассеянии, общепринятой терминологией для которых является описание гидродинамического диаметра частиц, представляющие собой как первичные частицы, так и их агрегаты и агломераты [14].

Ультразвуковую обработку порошков оксида магния проводили в ультразвуковой ванне при мощности ультразвука 2×240 Вт/период, частоте 35 кГц. Для гомогенизации компонентов смеси в расплаве использовали двухшнековый экструдер. После экструдирования образец дро-

били, размалывали в порошок. Для получения покрытий порошковые композиции наносили на сталь электростатическим способом напыления и отверждали при температуре 120–130 °С. Смешение компонентов композиции в расплаве проводилось при различных параметрах экструдирования: скорости вращения шнеков (200–400 об/мин) и времени экструдирования, которое регулировалось скоростью подачи сырьевых компонентов в экструдер.

Адгезию определяли методом решетчатых надрезов по ГОСТ 15140, прочность на удар измеряли по ГОСТ 4765 (диаметр бойка – 8 мм, масса груза – 2000 г), твердость по Бухгольцу – по ГОСТ 22233, твердость по маятниковому прибору ТМЛ – по ГОСТ 5233, прочность покрытий при растяжении – по ГОСТ 29309. Морфологию поверхности образцов изучали с помощью сканирующего зондового микроскопа «Солвер нано» (NT-MDT) в полуконтактном режиме.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 приведены дифференциальные кривые распределения частиц по размерам для спиртовых суспензий оксида магния: *a* – в диапазоне измерений 3–2400 нм; *b* – в диапазоне измерений 0,3–100 мкм. Перед измерением растворы подвергали ультразвуковой обработке в течение 2 мин. Как следует из данных рис. 1, распределение частиц MgO в спиртовых суспензиях имеет бимодальный характер с максимумами для н-MgO при 500 нм и 2,3 мкм, 1,4 и 7,5 мкм для лаб-MgO. Из анализа кривых рис. 1 видно, что спиртовые суспензии MgO, полученные путем ультразвукового диспергирования, не содержат отдельных наноразмерных частиц. Вследствие высокой химической активности исследуемые порошки MgO обладают высокой склонностью к агрегированию и характеризуются высокой степенью полидисперсности. При этом образец MgO-лаб имеет более высокую полидисперсность, чем н-MgO. Вторичные структуры (агрегаты и агломераты) образуются в основном за счет активных функциональных поверхностных OH-групп. При хранении образца н-MgO агрегирование частиц (кривые 1 и 2) усиливается: для н-MgO на кривых наблюдается сдвиг максимума от 500 до 1000 нм и от 2,3 до 5 мкм.

Для разрушения агрегатов н-MgO использовали диспергирование в расплаве. При получении порошковых композиций, модифицированных лаб-MgO, спиртовые суспензии оксида магния предварительно (перед диспергированием в расплаве) подвергали ультразвуковому (УЗ) диспергированию. Учитывая склонность частиц оксида магния к агрегации, для снижения степени агрегации и стабилизации размера частиц н-MgO проведен выбор ряда ПАВ (октадециламин, лизин, сополимер на основе полиакрилата – Disperbyk-191, имеющий якорные группы и ПАВ-образную структуру), определены оптимальные режимы ультразвукового диспергирования лаб-MgO в присутствии ПАВ. Среди исследованных ПАВ лучшие результаты были получены с октадециламином.

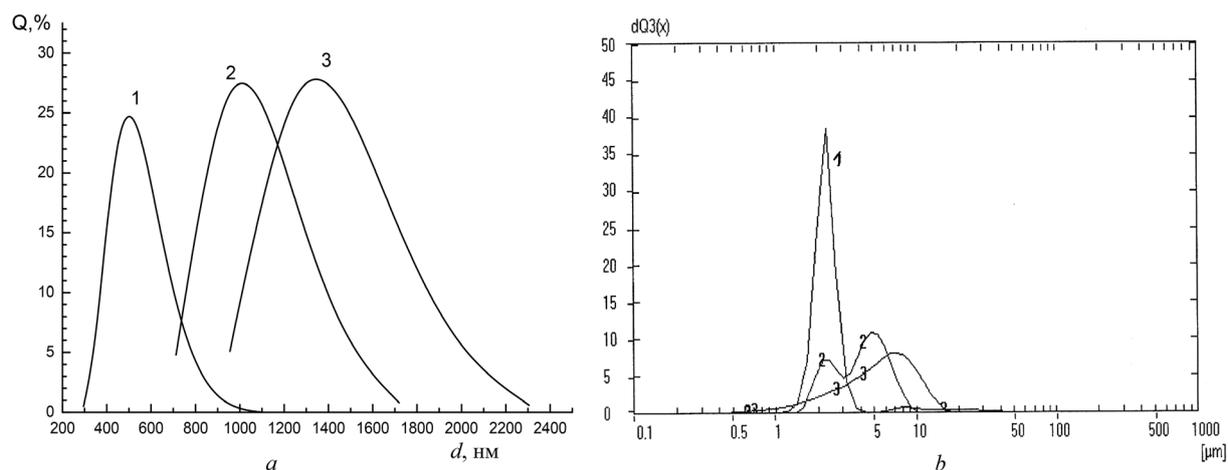


Рис. 1. Дифференциальные кривые распределения частиц по размерам для спиртовых суспензий оксида магния: *a* – в диапазоне измерений 3–2400 нм; *b* – в диапазоне измерений 0,3–50 мкм. 1 – промышленный образец производства компании ChemPur, 2 – образец № 1 после хранения в течение 1 года. 3 – лабораторный образец, полученный глицин-цитрат-нитратным методом

Fig. 1. Differential particle size distribution curves for for magnesium oxide alcohol suspensions: *a* – in the measurement range of 3–2400 nm; *b* – in the range of measurements of 0.3–100 μm. 1 – industrial sample produced by ChemPur, 2 – sample No. 1 after 1 year of storage, 3 – laboratory sample obtained by the glycine-citrate-nitrate method

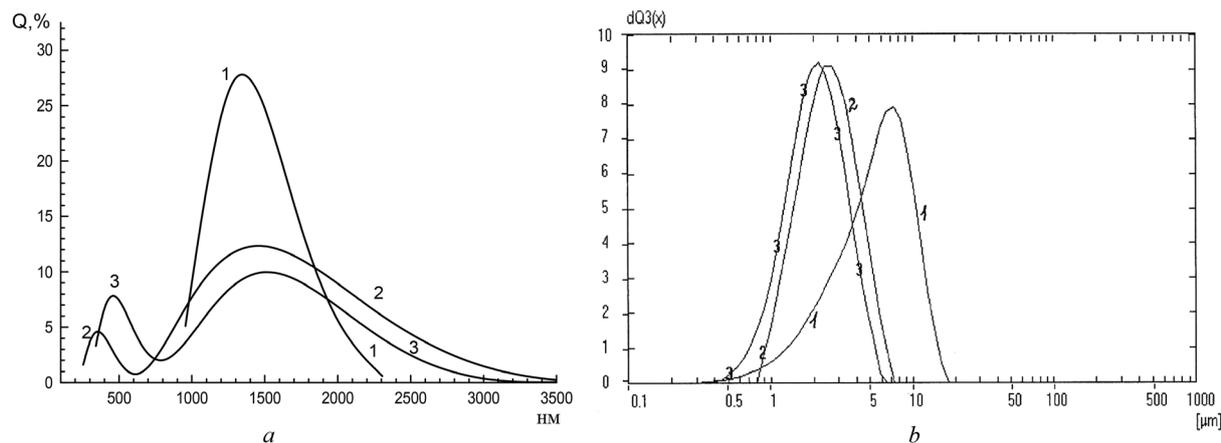


Рис. 2. Дифференциальные кривые распределения частиц по размерам для спиртовых суспензий оксида магния: *a* – в диапазоне измерений 100–3500 нм; *b* – в диапазоне измерений 0,3–50 мкм. 1 – лабораторный образец, полученный глицин-цитрат-нитратным методом, 2 – образец № 1, после ультразвукового воздействия в течение 75 мин в присутствии октадециламина, 3 – образец № 1, после ультразвукового воздействия в течение 120 мин в присутствии октадециламина

Fig. 2. Differential particle size distribution curves for magnesium oxide alcohol suspensions: *a* – in the measurement range of 100–3500 nm; *b* – in the range of measurements of 0.3–50 μm. 1 – laboratory sample obtained by the glycine-citrate-nitrate method; 2 – sample No. 1, after ultrasound treatment for 75 minutes in the presence of octadecylamine, 3 – sample No. 1, after ultrasound treatment for 120 minutes in the presence of octadecylamine

На рис. 2. приведены дифференциальные кривые распределения частиц по размерам для спиртовых суспензий оксида магния после ультразвукового воздействия в течение 75 и 120 мин в присутствии октадециламина. Время УЗ диспергирования выбирали, исходя из результатов предварительного эксперимента, который показал, что с увеличением массы порошка MgO растет число частиц, не прошедших кавитационную обработку, и для разрушения агломератов необходимо увеличивать длительность УЗ обработки.

Как следует из данных рис. 2, в сравнении с контрольным образцом ультразвуковая обработка приводит к появлению в суспензии более мелких частиц и уменьшению доли крупных агломератов. Полидисперсность порошка в этом случае составляет от 200 нм до 5–6 мкм. При этом наблюдаются три уровня агрегации частиц с максимумами при 330–450 нм, 1,3–1,5 мкм и 2–2,8 мкм.

Следует отметить, что при обработке спиртовых суспензий лаб-MgO в ультразвуковой ванне наблюдается низкая эффективность деагломерации. Это обусловлено прежде всего тем, что ультразвуковое воздействие осуществляется через передающую водную среду, а также стенки емкости с суспензией. Вследствие этого наблюдается резкое затухание ультразвуковых колебаний, что снижает эффективность кавитационного процесса и, как следствие, снижается эффективность процесса деагломерации. Другим недостатком является то, что во всем объеме ванны не достигается кавитационный процесс равной интенсивности. При использовании ультразвуковых диспергаторов погружного типа, по-видимому, можно добиться более высоких результатов по деагломерации частиц MgO.

Процесс отверждения полученных композитов изучали с помощью дифференциально-термического анализа на приборе NENZCH STA 409PC/PG при скорости нагрева 5 град/мин в среде аргона, масса образца – 85 мг. Как показали результаты исследования, процесс отверждения порошковых эпоксидных композиций, содержащих высокодисперсный оксид магния, характеризуется единственной областью стеклования и экзотермическим пиком, соответствующим тепловому эффекту отверждения. В табл. 1 приведены кинетические параметры реакции полимеризации эпоксидных порошковых композиций, модифицированных высокодисперсным оксидом магния. Одной из характеристик, отражающей изменение структуры полимерного материала, является его температура стеклования. Как видно из данных табл. 1, модификация эпоксидной матрицы дисперсными частицами оксида магния приводит к росту температуры стеклования (T_g). Данный эффект характерен для ряда эпоксидных композиций, модифицированных наночастицами [15].

Повышение температуры стеклования может быть связано с более высокой степенью конверсии эпоксидного олигомера в присутствии частиц $n\text{-MgO}$ и формировании пространственной структуры полимера с более регулярной и высокой частотой поперечных химических связей, чем в исходной системе. При этом, очевидно, происходит как химическое взаимодействие эпоксида с активными гидроксильными группами оксида магния, так и гомополимеризация эпоксидного олигомера, инициированная поверхностно-активными центрами MgO . Частично возможно также и образование водородных связей между эпоксидными группами и поверхностью оксида магния. Таким образом, высокодисперсные частицы MgO участвуют в процессе полимеризации и выступают как дополнительные узлы сшивки дефектных областей полимерной сетки.

Т а б л и ц а 1. Кинетические параметры реакции полимеризации эпоксидных порошковых композиций
Table 1. Kinetic parameters of the reaction of epoxy powder composition polymerization

Номер образца	Концентрация MgO , %	Температура стеклования, T_g , °C	Температура максимума, T_{\max} , °C	Тепловой эффект, Q , Дж/г
1	0	67	150	38,6
2	0,02 – $n\text{-MgO}$	74	152	38,9
3	0,02 – $n\text{-MgO}$	74	156	38,5
4	0	67	154	38,5
5	0,5 – лаб- MgO	76	155	43,8
6	1,5 – лаб- MgO	76	157	45,7

П р и м е ч а н и е. *Скорость вращения шнека: образцы № 1, 2, 4–6 – 400 об/мин, образец № 3 – 200 об/мин.

Следует отметить, что уменьшение скорости вращения шнека до 200 об/мин приводит к незначительному сдвигу температуры максимума экзотермического пика T_{\max} в сторону более высоких температур. В сравнении с контрольным образцом для порошковых композиций № 5, 6, модифицированных оксидом магния предварительно обработанным ультразвуком в присутствии октадециламина, с ростом концентрации оксида магния наблюдается увеличение тепловых эффектов процесса отверждения и T_{\max} .

В табл. 2 приведены технологические свойства порошковой эпоксидной композиции, модифицированной оксидом магния, и физико-механические свойства покрытий на ее основе. Как следует из сопоставления технологических свойств образцов № 1 и 2, введение в состав композиции 0,02 % $n\text{-MgO}$ уменьшает время гелеобразования и увеличивает вязкость расплава. Уменьшение времени гелеобразования и снижение вязкости расплава также наблюдается и при увеличении в составе композиций концентрации оксида магния, стабилизированного октадециламином (образцы № 5 и 6). Наблюдаемое увеличение вязкости расплава косвенно свидетельствует о высокой степени диспергирования частиц MgO в эпоксидном олигомере, аналогично рассмотренному в работе [6]. Таким образом, введение высокодисперсных частиц MgO оказывает влияние на процессы структурообразования эпоксидной композиции при отверждении. Необходимо отметить, что в отличие от модифицированных композиций, при снижении скорости подачи сырьевых компонентов в экструдер для композиции, не содержащей оксида магния, наблюдается увеличение времени гелеобразования и уменьшение вязкости расплава, что следует из сопоставления технологических свойств образца № 4 и 1.

Режимы экструдирования (скорость вращения шнека и время экструдирования, которое регулировалось скоростью подачи сырьевых компонентов в экструдер) оказывают влияние на технологические свойства порошковой композиции и покрытий на ее основе. Снижение скорости вращения шнеков до 200 об/мин (образец № 3) приводит к увеличению времени гелеобразования, уменьшению вязкости расплава и физико-механических показателей покрытий. По-видимому, сдвиговых усилий при данной скорости вращения шнеков недостаточно для полного разрушения агрегатов $n\text{-MgO}$.

Как известно [16], крупные агрегаты частиц, образующиеся на стадии изготовления композиционного материала, являясь концентраторами напряжений, способны свести эффект модификации

Таблица 2. Технологические и физико-механические свойства порошковых эпоксидных композиций и покрытий на их основе

Table 2. Technological and physicomachanical properties of powder epoxy compositions and coatings based on them

Технологические и физико-механические свойства порошковых эпоксидных композиций	1	2	3*	4**	5**	6**
	Концентрация MgO, %					
	0	0,02	0,02	0	0,5	1,5
Время гелеобразования, с, при 130 °С при 140 °С	238	215	272	369	254	250
	211	193	239	220	200	200
Растекаемость расплава, мм при 130 °С, при 140 °С	40	30	55	85	60	61
	46	34	63	77	49	51
Физико-механические параметры определены при термовременном режиме получения покрытий 130 °С / 20 мин						
Адгезия	0	0	0	0	0	0
Прочность покрытий при ударе, см	130	190	100	140	190	190
Прочность при растяжении на прессе Эриксона, мм	7,0	10	6	7,5	9,5	9,5
Твердость по Бухгольцу, усл.ед.	105	111	105	105	105	105

* Скорость вращения шнека: образцы № 1, 2, 4–6 – 400 об/мин, образец № 3 – 200 об/мин. ** Образцы получены при снижении скорости подачи материала на 40 %.

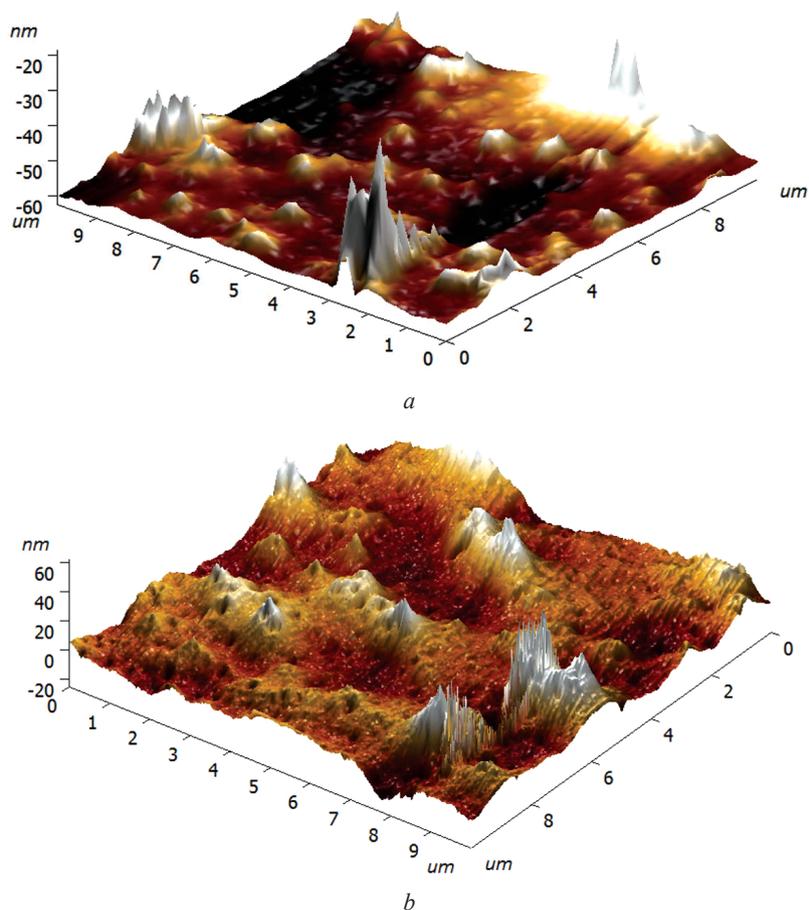


Рис. 3. Топография поверхности отвержденных покрытий: *a* – контрольный образец, *b* – образец, модифицированный n-MgO

Fig. 3. Surface topography of hardened coatings: *a* – reference sample, *b* – sample, modified with n-MgO

на ноль. В нашем случае для образца № 3 в сравнении с контрольным образцом наблюдается снижение прочности покрытия при растяжении практически в 1,5 раза и прочности на удар в 2 раза. Из этих данных следует, что одним из основных препятствий для повышения физико-механических характеристик покрытий является высокая склонность оксида магния к агрегации.

Принимая во внимание полученные экспериментальные данные, можно отметить, что для снижения степени агрегации частиц необходима оптимизация режимов экструзионного смешения компонентов в расплаве, модификация поверхности частиц MgO с целью повышения степени сродства к полимерной матрице и разрушение агрегатов частиц после смешивания компонентов.

Как следует из данных табл. 2, покрытия на основе модифицированных композиций характеризуются высокими физико-механическими показателями при низкотемпературном отверждении (130 °C): прочность на удар составляет 190 см, прочность при растяжении на прессе Эриксона – 9–10 мм, твердость по Бухгольцу – не менее 105 усл.ед., адгезия, баллы – 0. Физико-механические характеристики эпоксикомпозитов с MgO определяются в большей мере характером его распределения в полимерной матрице. Для оценки возможных различий в микроструктуре отвержденных покрытий проведено исследование морфологии поверхности покрытий методом сканирующей зондовой микроскопии. На рис. 3 приведены изображения (3D) поверхности отвержденных покрытий контрольного образца (несодержащего оксид магния) и образца на основе композиции, модифицированной высокодисперсным оксидом магния (образцы для исследования получали методом электростатического напыления на кремниевые пластины и отверждали при 130 °C). Как видно из данных рис. 3, наблюдаются существенные различия в структуре поверхности отвержденных покрытий. Образец, модифицированный высокодисперсным оксидом магния, имеет более равномерную и упорядоченную структуру в сравнении с немодифицированным. Средняя квадратичная шероховатость (рассчитанная по программе) для модифицированного образца в 2 раза ниже, чем для немодифицированного и составляет соответственно 4,9 и 10,5 нм (шероховатость кремниевой пластины – 0,38 нм).

Заключение. Исследован процесс формирования эпоксидных порошковых композиций с участием высокодисперсного оксида магния (н-MgO, первичный размер частиц 36 нм и лаб-MgO – 115 нм, вторичный – в силу формирования агрегатов – от 200 нм до 7–10 мкм) при получении композиций методом экструзионного смешения компонентов в расплаве. Для снижения степени агрегации и стабилизации частиц лаб-MgO проведен выбор ряда ПАВ, определены оптимальные режимы ультразвукового диспергирования MgO в присутствии ПАВ и режимы экструзионного смешения компонентов, обеспечивающие разрушение агрегатов частиц.

Установлено, что модификация порошковых эпоксидных композиций высокодисперсными частицами оксида магния увеличивает эффективность процесса полимеризации. В сравнении с немодифицированными образцами наблюдается снижение продолжительности гелеобразования, рост температуры стеклования, что свидетельствует о более высокой степени конверсии эпоксидного олигомера в присутствии частиц MgO и формировании пространственной структуры полимера с более высокой частотой поперечных химических связей. Высокодисперсные частицы MgO участвуют в процессе полимеризации и выступают как дополнительные узлы сшивки дефектных областей полимерной сетки. Покрытия на основе модифицированных композиций характеризуются высокими физико-механическими показателями при низкотемпературном отверждении (130 °C): прочность на удар составляет 190 см, прочность при растяжении на прессе Эриксона – 10 мм, твердость по Бухгольцу – не менее 105 усл. ед., адгезия, баллы – 0. Полученные результаты могут быть использованы для создания порошковых эпоксидных нанокомпозитов низкотемпературного отверждения, обеспечивающих формирование защитных покрытий на термочувствительных изделиях (древесноволокнистые плиты, МДФ, пластмассы, изделия электронной промышленности).

Список использованных источников

1. Chen, C. Epoxy layered-silicate nanocomposites / C. Chen, M. Knobaib, D. Curliss// Progress in Organic Coatings. – 2003 – Vol. 47. – N 3–4. – P. 376–383. [https://doi.org/10.1016/s0300-9440\(03\)00130-9](https://doi.org/10.1016/s0300-9440(03)00130-9)

2. Bagherzadeh, M. R. Preparation of epoxy-clay nanocomposite and investigation on its anti-corrosive behavior in epoxy coating / M. R. Bagherzadeh, F. Mahdavi // *Progress in Organic Coatings*. – 2007. – Vol. 60, N 2. – P. 117–120. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2007.07.011>
3. Zheng, Y. Effects of nanoparticles on the anticorrosion and mechanical properties of epoxy coating / Y. Zheng, R. Ning // *Materials Letters*. – 2003. – Vol. 57. – N 19. – P. 2940–2944. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(02\)01401-5](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)01401-5)
4. Верхованцев, В. В. Наноматериалы в технологии лакокрасочных покрытий / В. В. Верхованцев // *Лакокрасочные материалы и их применение*. – 2004. – № 10. – С. 20–23.
5. Исследование влияния монтмориллонита на структуру и свойства порошковых эпоксидных композиций для полимерных покрытий / Г. В. Ваганов [и др.] // *Журн. прикл. химии*. – 2011. – Т. 84. – № 8. – С. 1343–1349.
6. Эпоксидные порошковые композиции с силикатными наночастицами различной морфологии / Г. В. Ваганов [и др.] // *Лакокрасочные материалы и их применение*. – 2011. – № 11. – С. 37–41.
7. Сычев, М. М. Кислотно-основные характеристики твердых тел и управление свойствами материалов и композиций / М. М. Сычев, Т. С. Минакова, Ю. Г. Слизов, О. А. Шилова. – Санкт-Петербург: Химиздат, 2016. – 276 с.
8. Физико-химические закономерности создания новых гибридных эпоксиполимерных нанокomпозитов с повышенными прочностными характеристиками / П. А. Ситников [и др.] // *Изв. Коми науч. центра УРО РАН*. – 2016. – № 1(25). – С. 18–22.
9. Екимова, И. А. Кислотно-основные, адсорбционные и фотосорбционные свойства образцов оксида магния / И. А. Екимова, Т. С. Минакова // *Защита металлов*. – 2008. – Т. 44, № 3. – С. 330–334.
10. Екимова, И. А. Кислотно-основные и адсорбционные свойства поверхности оксидов и фторидов щелочноземельных металлов и магния / И. А. Екимова, Т. С. Минакова // *Ползуновский вестн.* – 2013. – № 1. – С. 67–71.
11. Ингибитор коррозии черных металлов: патент RU №2197563 / М. Г. Иванов. – Оpubл. 27.01.2003.
12. Федосеев, А. В. Получение противокоррозионного пигмента механо-химической обработкой оксида магния / А. В. Федосеев, А. В. Сороков, С. Н. Степин // *Вестн. технол. ун-та*. – 2012. – Т. 15. – В. 22. – С. 69–70.
13. Влияние метода получения на адсорбционные свойства наноструктурированного порошка MgO / И. В. Мацукевич [и др.] // *Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер.хім. навук*. – 2018. – Т. 54, № 3. – С. 281–288. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-3-281-288>
14. Meyers, R. A. *Encyclopedia of Analytical Chemistry: Applications, Theory and Instrumentation* / R. A. Meyers. – N. Y. : Wiley, 2006. – 14344 p. <https://doi.org/10.1002/9780470027318>
15. Физико-механические свойства нанокomпозитов с УНТ / С. В. Кондрашов [и др.] // *Труды ВИАМ*. – 2016. – № 5. – С. 61–83. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-5-8-8>
16. Микромодификация смеси эпоксидианового связующего и полиметилена-*n*-трифенилбората детонационными нанокomпозитами и наноалмазами / Л. Г. Полукеева [и др.] // *Ползуновский вестник*. – 2008. – № 3. – С. 228–232.

References

1. Chen C., Knobaib M., Curliss D. Epoxy layered-silicate nanocomposites. *Progress in Organic Coatings*, 2003, vol. 47, no. 3–4, pp. 376–383. [https://doi.org/10.1016/S0300-9440\(03\)00130-9](https://doi.org/10.1016/S0300-9440(03)00130-9)
2. Bagherzadeh M. R., Mahdavi F. Preparation of epoxy-clay nanocomposite and investigation on its anti-corrosive behavior in epoxy coating. *Progress in Organic Coatings*, 2007, vol. 60, no. 2, pp. 117–120. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2007.07.011>
3. Zheng Y., Ning R. Effects of nanoparticles on the anticorrosion and mechanical properties of epoxy coating. *Materials Letters*, 2003, vol. 57, no. 19, pp. 2940–2944. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(02\)01401-5](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)01401-5)
4. Verkholantsev V. V. Nanomaterials in paint coating technology. *Lakokrasochnie materialy i ikh primenenie = Russian Coatings Journal*, 2004, no. 10, pp. 20–23 (in Russian).
5. Vaganov G.V., Evtuyukov N.Z., Mashlyakovskii L.N., Yudin V.E., Elokhovskii V.Yu., Ivan'kova E.M., Volkov A.Y., Sukhanova T.E. Effect of montmorillonite on the structure and properties of powder epoxy compounds for polymeric coatings. *Russian journal of applied chemistry*, 2011, vol. 84, no. 8, pp. 1408–1413. <https://doi.org/10.1134/s1070427211080192>
6. Vaganov G. V., Yudin V. E., Mashlyakovskii L. N., Evtukov N. Z., Elokhovskii V. Yu. Epoxy powder coatings with silicate nanoparticles of different morphology. *Lakokrasochnye materialy i ih primenenie = Russian Coatings Journal*, 2011, no. 11, pp. 37–41 (in Russian).
7. Sychev M. M., Minakova T. S., Slizhov Yu. G., Shilova O. A. *Acid-base characteristics of solids and control of the properties of materials and composites*. St. Petersburg, Himizdat Publ., 2016. 276 p. (in Russian).
8. Sitenkov P. A., Ryabkov Yu. I., Belykh A. G., Vaseneva I. N., Kuchin A. V. Physical and chemical regularities of creating new hybrid epoxy-polymer nanocomposites with increased strength characteristics. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra URO RAN* [News of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences], 2016, no. 1(25), pp. 18–22 (in Russian).
9. Ekimova I. A., Minakova T. S. Acid-base, adsorption and photosorption properties of magnesia samples. *Protection of Metals*, 2008, vol. 44, no. 3, pp. 310–313. <https://doi.org/10.1134/s0033173208030156>
10. Ekimova I. A., Minakova T. S. Acid-base and adsorption properties of the surface of oxides and fluorides of alkaline earth metals and magnesium. *Polzunovskii vestnik = Polzunovsky vestnik*, 2013, no. 1, pp. 67–71 (in Russian).
11. Ivanov M. G. *Corrosion inhibitor of ferrous metals*. Patent no. 2197563 RU. Publ. date. 27.01.2003 (in Russian).
12. Fedoseev A. V., Sorokov A. V., Stepin S. N. Obtaining an anticorrosive pigment by mechanical and chemical treatment of magnesium oxide. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta = Herald of Kazan Technological University*, 2012, vol. 15, pp. 69–70 (in Russian).

13. Matsukevich I. V., Krutko N. P., Ovseenko L. V., Polkhovskaya O. V., Hubitski D. V., Vashuk V. V. Effect of preparation method on physicochemical properties of nanostructured MgO powder. *Vesti Natsyional'noi akademii navuk Belarusi. Seryia khimicheskikh navuk* = *Proceeding of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*, 2018, vol. 54, no. 3, pp. 281–288 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-3-281-288>

14. Meyers R. A. *Encyclopedia of Analytical Chemistry: Applications, Theory and Instrumentation*. New York, Wiley, 2006. 14344 p. <https://doi.org/10.1002/9780470027318>

15. Kondrashov S. V., Shashkeev K. A., Popkov O. V., Solovianchik L. V. Mechanical properties of CNT nanocomposites (review). *Proceedings of VIAM*, 2016, no. 5, pp. 61–83 (in Russian). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-5-8-8>

16. Polukeeva L. G., Ananyeva E. S., Khvostov A. S., Larionova I. S., Shatskaya T. E., Ishkov A. V. Micromodification of a mixture of epoxydian binder and polymethylene-*n*-triphenylborate by detonation nanocarbons and nanodiamonds. *Polzunovskii vestnik = Polzunovsky vestnik*, 2008, no. 3, pp. 228–232 (in Russian).

Информация об авторах

Комарь Валентина Васильевна – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kvv@igic.bas-net.by

Походина Татьяна Александровна – науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь).

Кулинич Наталья Владимировна – науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь).

Крутько Николай Павлович – академик, д-р хим. наук, зав. отделом. Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: krutko@igic.bas-net.by

Овseenko Людмила Васильевна – канд. хим. наук, зам. директора. Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ovseenko@igic.bas-net.by

Information about the authors

Valentina V. Komar – Ph. D. (Chemistry), Senior Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kvv@igic.bas-net.by

Tatsiana A. Pochodina – Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus).

Natallia V. Kulnich – Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus).

Nikolai P. Krut'ko – Academician, D. Sc. (Chemistry), Head of the Department. Institute of General and Inorganic Chemistry. National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: krutko@igic.bas-net.by

Ludmila V. Ovseenko – Ph. D. (Chemistry), Deputy Director. Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ovseenko@igic.bas-net.by