

СИНТЕЗ И ПЕРЕРАБОТКА ПОЛИМЕРОВ И КОМПОЗИТОВ НА ИХ ОСНОВЕ

УДК 678.072; 678.01

МОДИФИКАЦИЯ ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ НАНОДИСПЕРСНЫМ ОКСИДОМ АЛЮМИНИЯ

А.С. Мостовой^{1,@}, А.А. Таганова¹, К.В. Прокопович¹, Е.В. Яковлева²

¹Энгельсский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»,
г. Энгельс, Саратовская область 413100, Россия

²Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова,
Саратов 410012, Россия

@Автор для переписки, e-mail: Mostovoy19@rambler.ru

Целью данной работы являлось повышение физико-химических и механических свойств эпоксидных композитов с применением в качестве структурирующей добавки нанодисперсного оксида алюминия. В результате проведенных исследований доказана возможность направленного регулирования эксплуатационных свойств эпоксидных композитов за счет использования малых добавок наноразмерного Al_2O_3 , обеспечивающего создание эпоксидных композитов с высокими эксплуатационными свойствами, удовлетворяющими требованиям большинства отраслей промышленности. Выбрано рациональное содержание Al_2O_3 как наноструктурирующей добавки в составе эпоксидной композиции (0,05 масс. ч.), обеспечивающее повышение изученного комплекса физико-механических свойств: в 3,3 раза возрастает разрушающее напряжение и на 27% повышается модуль упругости при изгибе, на 43% повышается разрушающее напряжение при сжатии, на 47-50% возрастает разрушающее напряжение и модуль упругости при растяжении, в 3 раза возрастает ударная вязкость, а также на 67% возрастает твердость, при сохранении термостойкости. Установлено, что введение Al_2O_3 оказывает влияние на процессы структурообразования эпоксидной композиции при отверждении – увеличивается продолжительность гелеобразования с 45 до 75 мин и продолжительность отверждения с 53 до 100 мин, при этом максимальная температура отверждения не изменяется. Таким образом, разработанные материалы могут быть использованы для герметизации изделий электронной техники, для пропитки и заливки узлов в авиа-, судо- и автомобилестроении.

Ключевые слова: эпоксидная смола, модификация, оксид алюминия, физико-химические и механические свойства.

MODIFICATION OF EPOXY POLYMERS WITH THE USE OF NANOSIZED OF ALUMINIUM OXIDE

A.S. Mostovoi^{1,@}, A.A. Taganova¹, K.V. Prokopovich¹, E.V. Yakovleva²

¹Engels Technological Institute (branch) of the Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,
Engels, Saratov region 413100, Russia

²N.I. Vavilov Saratov State Agrarian University, Saratov 410012, Russia

@Corresponding author e-mail: Mostovoy19@rambler.ru

The aim of this work was to improve the physical, chemical and mechanical properties of epoxy composites with the use of nanosized aluminium oxide. The studies proved the possibility of directional control of the operational properties of epoxy composites by the use of small additions of nanosized aluminium oxide ensuring the creation of epoxy composites with high performance, satisfying the requirements of most industries. The rational content of aluminium oxide as a nanostructuring additive in an epoxy composition was selected (0,05 parts by weight). It ensures an increase in the complex of physico-mechanical properties (the breaking stress increases 3.3-

fold, and the flexural modulus increases by 27%, the breaking stress in compression improves by 43%, the breaking stress and the tensile modulus of elasticity increases by 47–50%, the toughness increases 3-fold, and the hardness increases by 67%), while maintaining heat resistance. The introduction of nanosized aluminium oxide changes the parameters of the epoxy oligomer curing kinetics: the gelation duration increases from 45 to 75 minutes, and the duration of cure, from 53 to 100 minutes, while the maximum curing temperature is practically unchanged. Thus, the developed materials may be used for sealing electronic articles, for impregnating and filling components in aircraft engineering, shipbuilding and, automotive industry.

Keywords: epoxy resin, modification, aluminium oxide, physico-chemical and mechanical properties.

Введение

Эпоксидные смолы характеризуются высокой адгезией к материалам различной природы, поэтому их широко используют в качестве основного компонента лакокрасочных материалов, клеев, герметиков, полимерных композиционных материалов и т.д. В настоящее время с совершенствованием технологий возрастает потребность промышленности в современных материалах из эпоксидных смол с улучшенными эксплуатационными и технологическими характеристиками. Однако заключается это не столько в разработке новых, сколько в модификации известных материалов.

Регулировать свойства эпоксидных полимеров в широком диапазоне без значительного изменения технологии приготовления составов возможно при использовании в качестве добавок различных модифицирующих веществ. Для модификации эпоксидных смол используются пластификаторы, активные разбавители, мономерные и олигомерные продукты, эластификаторы и наполнители [1–17].

Введение нанодисперсных наполнителей является наиболее эффективным способом направленного регулирования свойств эпоксидных полимеров, позволяющим повысить показатели механической прочности и жесткости, химической стойкости, теплостойкости, диэлектрических свойств. Необходимость использования нанодисперсных наполнителей можно рассматривать в одном из двух аспектов: получения материала с новыми функциональными свойствами, либо для повышения уже имеющихся характеристик [8, 9, 18–20].

В качестве нанопополнителей широко используют различные виды углеродных нанотрубок, фуллеренов, графенов, астраленов, технических углеродов, а также диоксиды титана и кремния, алмазную шихту, белую сажу и т. д. [1, 5, 8, 10, 18–21].

Целью данной работы являлось повышение физико-химических и механических свойств эпоксидных композитов с применением в качестве структурирующей добавки нанодисперсного оксида алюминия.

Экспериментальная часть

Составы разрабатывались на основе эпоксидной диановой смолы марки ЭД-20 (ГОСТ 10587-93). В качестве отвердителя эпоксидного олигомера применялся отвердитель аминного типа – полиэтиленполиамин (ПЭПА) (ТУ 6-02-594-85), способный формировать трехмерную сетчатую структуру в отсутствие нагрева.

Для пластификации эпоксидных композитов в работе использовали трихлорэтилфосфат (ТХЭФ). Выбор ТХЭФ обусловлен наличием в его составе ингибиторов горения – фосфора (10.8%) и хлора (36.9%), которые структурируют эпоксидный полимер при воздействии на него повышенных температур и обеспечивают увеличение выхода карбонизованных структур. Кроме того, образующийся при пиролизе композиций, содержащих ТХЭФ, хлор, попадая в газовую фазу, разбавляет горючие газы, снижая концентрационный предел воспламенения, что в целом снижает горючесть эпоксидного композита [10, 12, 16, 17]. В качестве структурирующей добавки применялся нанодисперсный оксид алюминия (Al_2O_3).

В работе применяли методы исследования физико-механических свойств согласно ГОСТ.

Методом термогравиметрического анализа изучали изменение массы, скорости изменения массы и величин тепловых эффектов при нагреве образцов с использованием дериватографа системы «Паулик–Паулик–Эрдей» фирмы MOM марки Q-1500D (ГОСТ 29127-91). Морфологию поверхности образцов изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA 3 SBH. Кинетику отверждения эпоксидной композиции определяли по методике, описанной в работе [11]. Удельную поверхность образцов определяли на анализаторе удельной поверхности и пористости Quantachrome Nova 2200 с использованием метода низкотемпературной адсорбции азота.

Результаты и их обсуждение

Фракционный состав порошка Al_2O_3 характеризуется мономодальным распределением частиц и

представлен частицами с размерами от 30 до 90 нм, со средним размером частиц 60-70 нм, что дает основание причислить его к наноматериалам (рис. 1).

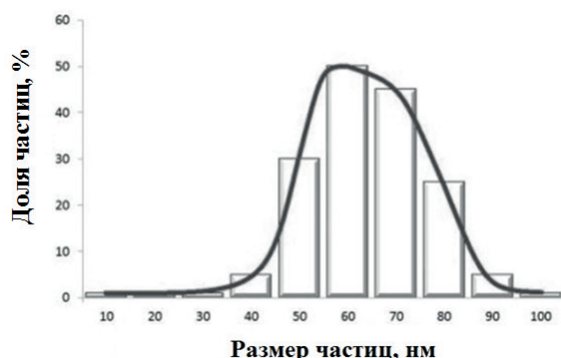


Рис. 1. Фракционный состав дисперсного Al₂O₃.

Значение удельной поверхности частиц Al₂O₃, определенное на анализаторе удельной поверхности и пористости, составило 31.2 м²/г.

Таким образом, анализ структуры и удельной поверхности нанодисперсного Al₂O₃ показал, что он может быть использован в качестве наноструктурирующей добавки для эпоксидных композитов, которая должна обеспечить повышение их эксплуатационных свойств.

В качестве полимерной матрицы использован ранее разработанный состав [10, 12], состоящий из 100 масс. ч. эпоксидной смолы марки ЭД-20, 40 масс. ч. – трихлорэтилфосфата (ТХЭФ) и 15 масс. ч. отвердителя – полиэтиленполиамины (ПЭПА).

ТХЭФ выполняет одновременно функции и пластификатора, и замедлителя горения (антипирена). При этом достигается повышение вдвое (с 17 до 34 МПа) значения разрушающего напряжения при изгибе и устойчивости к действию ударных нагрузок – с 3 до 8 кДж/м², при этом значительно (с 78 до 5%) снижаются потери массы при поджигании на воздухе, а показатель воспламеняемости – кислородный индекс (КИ) возрастает с 19 до 27% об., что обеспечивает переход материала в класс трудновоспламеняемых [10, 12]. Кроме того, доказано [12] наличие химического взаимодействия ТХЭФ с эпоксидным олигомером в процессе отверждения.

Наночастицы Al₂O₃ вводили в эпоксидную композицию в количестве 0.01–0.1 масс. ч. Для повышения равномерности распределения Al₂O₃, а также активации его поверхности и связующего применяли ультразвуковую обработку композиций.

Ультразвуковое воздействие на жидкие среды настолько эффективно и уникально, что аналогичных результатов невозможно достичь высокоскоростным перемешиванием или низкочастотной вибрацией. Уникальность воздействия обеспечивается возникновением в жидких средах кавитационных парогазовых пузырей, накапливающих энергию при

их расширении и взрывающихся при сжатии с созданием ударных волн и кумулятивных струй [13, 22].

Ультразвуковую обработку проводили на приборе УЗДН-2Т, при погружении излучателя непосредственно в колбу с эпоксидной композицией. Воздействие осуществляли на рабочей частоте 22±1.65 кГц, так как нами было установлено, что именно при этой частоте происходит наиболее интенсивная ультразвуковая обработка [10, 12]. При таких частотах, как показал эксперимент, газовые пузырьки имеют большие размеры и при кавитации выделяют больше энергии. В результате такого воздействия происходило снижение вязкости эпоксидной композиции, формирование и схлопывание кавитационных пузырей, объединяющихся и всплывающих на поверхность. Это обеспечивало дегазацию и активацию эпоксидной композиции. Дегазация, происходящая при ультразвуковой обработке материала, приводит к уменьшению воздушных включений, получению более монолитной структуры композита, а также препятствует агрегации частиц тонкодисперсного наполнителя. При таком воздействии наблюдается значительное повышение физико-механических характеристик.

Из результатов, представленных в табл. 1, следует, что наиболее рациональным содержанием Al₂O₃ в качестве наномодифицирующей добавки является 0.05 масс. ч., так как при этом достигаются максимальные значения физико-механических свойств: в 3.3 раза возрастает разрушающее напряжение и на 27% повышается модуль упругости при изгибе, на 43% повышается разрушающее напряжение при сжатии, на 47-50% возрастает разрушающее напряжение и модуль упругости при растяжении, в 3 раза возрастает ударная вязкость, а также на 67% возрастает твердость.

С позиции энергетической концепции, упрочнение эпоксидных композиций при введении Al₂O₃ происходит вследствие увеличения энергии, требующейся на разрушение материала, на величину энергии, затраченной на образование новой поверхности прохождения трещины, возникшей вследствие обтекания трещиной частиц Al₂O₃, а также на удлинение фронта трещины [3, 10, 13]. Снижение прочности при содержании Al₂O₃, меньшем или большем оптимального, является результатом неэффективного взаимодействия полимерной матрицы с частицами наполнителя.

При оценке влияния модифицирующей добавки на сетчатые полимеры необходимо учитывать, что процесс отверждения происходит в присутствии развитой поверхности твердого наполнителя, способного влиять на кинетические характеристики реакции полимеризации при отверждении, а также на процессы формирования фазовой структуры материала. Велика также роль адсорбционного взаимодействия

Таблица 1. Свойства эпоксидных композитов

Состав композиции, масс. ч., отвержденной 15 масс. ч. ПЭПА	$\sigma_{из}$, МПа	$E_{из}$, МПа	$\sigma_{сж}$, МПа	σ_p , МПа	E_p , МПа	$a_{уд}$, кДж/м ²	H_B , МПа
100ЭД-20	17	2654	78	26	2040	3	225
100ЭД-20+40ТХЭФ	34	1750	70	36	1610	8	84
100ЭД-20+40ТХЭФ+0.01Al ₂ O ₃	72	1903	80	34	1433	13	115
100 ЭД-20+40ТХЭФ+0.05Al ₂ O ₃	111	2227	100	53	2431	25	140
100ЭД-20+40ТХЭФ+0.1Al ₂ O ₃	99	2426	108	50	2119	20	165

Примечание: $\sigma_{из}$ – разрушающее напряжение при изгибе; $E_{из}$ – модуль упругости при изгибе; $\sigma_{сж}$ – разрушающее напряжение при сжатии; σ_p – разрушающее напряжение при растяжении; E_p – модуль упругости при растяжении; ϵ – относительное удлинение при растяжении; $a_{уд}$ – ударная вязкость; H_B – твердость по Бринеллю; коэффициент вариации по свойствам 3-5%.

компонентов олигомерного состава с твердой поверхностью наполнителя [6, 10, 12, 13].

Изучение кинетики отверждения эпоксидных составов, содержащих Al₂O₃ (рис. 2), показало, что он оказывает влияние на процессы структурообразования эпоксидного композита. Это проявляется в увеличении продолжительности гелеобразования с

45 до 75 мин и продолжительности отверждения с 53 до 100 мин, при этом максимальная температура отверждения не изменяется (табл. 2).

Методом термогравиметрического анализа было установлено, что введение 0.05 масс. ч. Al₂O₃ не снижает термостойкость эпоксидных композитов и обеспечивает повышение теплостойкости по Вика со 100 до 122 °С (табл. 3).

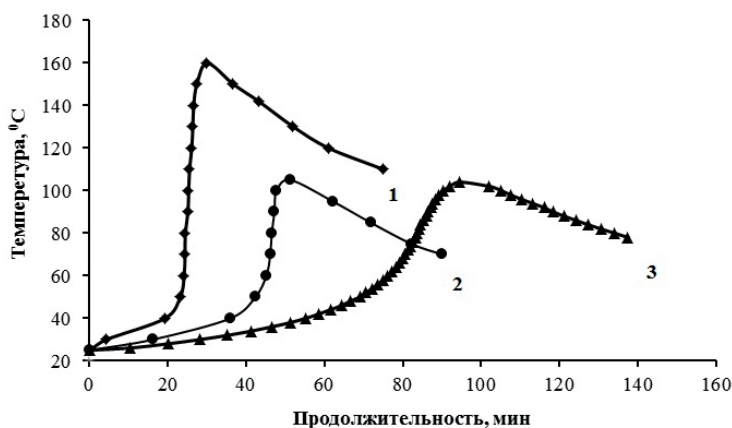


Рис. 2. Кинетика отверждения эпоксидных композиций (масс. ч.):

1 – 100ЭД-20+15ПЭПА; 2 – 100ЭД-20+40ТХЭФ+15ПЭПА; 3 – 100ЭД-20+40ТХЭФ+0.05Al₂O₃+15ПЭПА.

Таблица 2. Значения показателей процесса отверждения эпоксидных композиций

Состав композиции, масс.ч., отвержденной 15 масс.ч. ПЭПА	Продолжительность гелеобразования, мин	Продолжительность отверждения, мин	Максимальная температура отверждения, °С
100ЭД-20	24	36	160
100ЭД-20+40ТХЭФ	45	53	105
100ЭД-20+40ТХЭФ+0.05Al ₂ O ₃	75	100	104

Таблица 3. Физико-химические свойства эпоксидных композиций

Состав композиции, масс.ч., отвержденной 15 масс.ч. ПЭПА	T_n , °С	T_k , °С	Выход карбонизованных структур при T_k , % масс.	T_B , °С
100ЭД-20	200	390	40 (390 °С)	86
100ЭД-20+40ТХЭФ	180	360	55 (360 °С)	100
100ЭД-20+40ТХЭФ+0.05Al ₂ O ₃	180	365	50 (365 °С)	122

Примечание: T_n , T_k – начальная и конечная температура основной стадии термоллиза; T_B – теплостойкость по Вика.

Сравнение разработанных составов с существующими аналогами показало их конкурентоспособность, так как они имеют более высокие физико-механические (разрушающие напряжения при изгибе и растяжении, ударная вязкость и твердость) характеристики (табл. 4).

ханические (разрушающие напряжения при изгибе и растяжении, ударная вязкость и твердость) характеристики (табл. 4).

Таблица 4. Свойства эпоксидных композитов с разными структурирующими добавками

Состав композиций, масс. ч., отвержденных 15 масс. ч. ПЭПА	$\sigma_{из}$, МПа	$a_{уд}$, кДж/м ²	σ_p , МПа	H_v , МПа
100ЭД-20+42ТХЭФ+0.05 Al ₂ O ₃	111	25	53	140
Аналоги				
100ЭД-20+40ТХЭФ+0.1ПТК [10]	55	11	41	105
70ЭД-20+30ТКФ+0.1МОГ [15]	82	14	-	150
100ЭД-20+40ТКФ+0.1КП [13]	63	10	-	130

Примечание: ПТК – полититанаты калия; ТКФ – трикрезилфосфат; МОГ – модифицированная оболочка гречиши; КП – кирпичная пыль.

Заключение

В результате проведенных исследований показана возможность регулирования эксплуатационных свойств эпоксидных композитов при введении 0.05 масс. ч. наноразмерных частиц Al₂O₃, обеспечивающих создание эпоксидных композитов с высокими эксплуатационными свойствами, удовлетворяющими требованиям большинства отраслей промышленности.

Установлено, что введение наночастиц Al₂O₃ оказывает влияние на процессы структурообразования эпоксидной композиции при отверждении: увеличивается продолжительность гелеобразования с 45 до 75 мин и

время отверждения с 53 до 100 мин, при этом максимальная температура отверждения не изменяется.

Таким образом, разработанные материалы могут быть использованы для герметизации изделий электронной техники, для пропитки и заливки узлов в авиа-, судо- и автомобилестроении, в том числе при создании полимерных композитов конструкционного назначения с повышенными требованиями по пожарной безопасности. Последнее обусловлено тем, что разработанные композиты, обладая повышенными физико-механическими характеристиками, к тому же по показателям воспламеняемости и горючести относятся к классу трудновоспламеняемых.

Список литературы:

1. Radoman T.S., Dzunuzovic J.V., Jeremic K.B., Grgru B.G., Milicevic D.S., Popovic I.G., Dzunuzovic E.S. Improvement of epoxy resin properties by incorporation of TiO₂ nanoparticles surface modified with gallic acid esters // *Materials and Design*. 2014. № 62. P. 158–167.
2. Осипов П.В., Осипчик В.С., Смотровая С.А., Савельев Д.Н. Регулирование свойств наполненных эпоксидных олигомеров // *Пластические массы*. 2011. № 4. С. 3–5.
3. Золотарева В.В., Кочергин Ю.С. Влияние нанопорошков на механические и адгезионные свойства эпоксидных полимеров // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2016. № 1 (117). С. 62–67.
4. Мараховский К.М., Осипчик В.С., Водовозов Г.А., Папина С.Н. Модификация эпоксидного связующего с повышенными характеристиками для получения композиционных материалов // *Успехи в химии и хим. технологии*. 2016. Т. 30. № 10 (179). С. 56–58.
5. Старокадомский Д.Л., Ткаченко А.А., Гарашченко И.И. Изменение свойств композита полиэпоксид-нанокремнезем после модифицирования поверхности наполнителя исходной эпоксидной смолой // *Пластические массы*. 2015. № 5–6. С. 50–55.

References:

1. Radoman T.S., Dzunuzovic J.V., Jeremic K.B., Grgru B.G., Milicevic D.S., Popovic I.G., Dzunuzovic E.S. Improvement of epoxy resin properties by incorporation of TiO₂ nanoparticles surface modified with gallic acid esters // *Materials and Design*. 2014. № 62. P. 158–167.
2. Osipov P.V., Osipchik V.S., Smotrova S.A., Savel'ev D.N. Controlling the properties of filled epoxy oligomers // *Plasticheskie massy (Plastics)*. 2011. № 4. P. 3–5. (in Russ.).
3. Zolotareva V.V., Kochergin Yu.S. Effect of nanopowders to mechanical and adhesive properties of epoxy polymers // *Vestnik Donbasskoj nacional'noj akademii stroitel'stva i arhitektury (Vestnik of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture)*. 2016. № 1 (117). P. 62–67. (in Russ.).
4. Marahovskiy K.M., Osipchik V.S., Vodovozov G.A., Papina S.N. Modification of epoxy resins with enhanced characteristics for producing composite materials // *Uspеhi v himii i himicheskoy tehnologii (Successes in Chemistry and Chemical Technology)*. 2016. V. 30. № 10 (179). P. 56–58. (in Russ.).
5. Starokadomskiy D.L., Tkachenko A.A., Garashchenko I.I. Change of composite properties of polyepoxide-nanosilica after surface modification

6. Плакунова Е.В., Панова Л.Г. Исследование возможности использования технологических отходов химических производств в качестве наполнителей полимерных матриц // *Хим. пром.* 2013. Т. 90. № 6. С. 295–301.
7. Мостовой А.С. Использование эпоксисиланов при создании эпоксидных композитов с повышенными физико-химическими и механическими свойствами // *Перспективные материалы.* 2016. № 4. С. 60–66.
8. Mazov I.N., Burmistrov I.N., Ilinykh I.A., Stepashkin A., Kuznetsov D.V., Issi J.-P. Anisotropic thermal conductivity of polypropylene composites filled with carbon fibers and multiwall carbon nanotubes // *Polymer Composites.* 2015. V. 36. № 11. P. 1951–1957.
9. Muratov D.S., Kuznetsov D.V., Ilinykh I.A., Burmistrov I.N., Mazov I.N. Thermal conductivity of polypropylene composites filled with silane-modified hexagonal BN // *Composites Science and Technology.* 2015. V. 111. № 6. P. 40–43.
10. Mostovoi A.S., Yakovlev E.A., Burmistrov I.N., Panova L.G. Use of modified nanoparticles of potassium polytitanate and physical methods of modification of epoxy compositions for improving their operational properties // *Rus. J. Appl. Chem.* 2015. V. 88. № 1. P. 129–137.
11. Мостовой А.С. Олигооксипропиленгликоль – эффективный пластификатор для эпоксидных полимеров // *Вопросы материаловедения.* 2015. № 4 (84). С. 117–122.
12. Мостовой А.С., Плакунова Е.В., Панова Л.Г. Разработка огнестойких эпоксидных композиций и исследование их структуры и свойств // *Перспективные материалы.* 2014. № 1. С. 37–43.
13. Мостовой А.С., Панова Л.Г., Курбатова Е.А. Модификация эпоксидных полимеров кремнийсодержащим наполнителем с целью повышения эксплуатационных свойств // *Вопросы материаловедения.* 2016. № 2 (86). С. 87–95.
14. Ширшова Е.С., Татаринцева Е.А., Плакунова Е.В., Панова Л.Г. Изучение влияния модификаторов на свойства эпоксидных композиций // *Пластические массы.* 2006. № 12. С. 34–36.
15. Еремеева Н.М., Никифоров А.В., Свешникова Е.С., Панова Л.Г. Исследование свойств эпоксидных композиций на основе модифицированных целлюлозосодержащих материалов // *Молодой ученый.* 2015. № 24.1 (104.1). С. 20–23.
16. Кадыкова Ю.А., Улегин С.В. Направленное регулирование свойств эпоксидных композитов // *Известия Волгоградского государственного технического университета.* 2015. № 7 (164). С. 130–131.
17. Улегин С.В., Кадыкова Ю.А., Артеменко С.Е., Демидова С.А. Наполненные базальтом эпоксидные композиционные материалы // *Пластические массы.* 2013. № 2. С. 31–33.
- of filler by initial epoxy resin // *Plasticheskie massy (Plastics).* 2015. № 5-6. P. 50–55. (in Russ.).
6. Plakunova E.V., Panova L.G. Study the possibility of using technological chemical production waste as fillers of polymer matrices // *Himicheskaja promyshlennost' (Chemical Industry).* 2013. V. 90. № 6. P. 295–301. (in Russ.).
7. Mostovoi A.S. Using of epoxysilanes for creation of epoxy composites with increased physico-chemical and mechanical properties // *Perspektivnyye materially (Perspective Materials).* 2016. № 4. P. 60–66. (in Russ.).
8. Mazov I.N., Burmistrov I.N., Ilinykh I.A., Stepashkin A., Kuznetsov D.V., Issi J.-P. Anisotropic thermal conductivity of polypropylene composites filled with carbon fibers and multiwall carbon nanotubes // *Polymer Composites.* 2015. V. 36. № 11. P. 1951–1957.
9. Muratov D.S., Kuznetsov D.V., Ilinykh I.A., Burmistrov I.N., Mazov I.N. Thermal conductivity of polypropylene composites filled with silane-modified hexagonal BN // *Composites Science and Technology.* 2015. V. 111. № 6. P. 40–43.
10. Mostovoi A.S., Yakovlev E.A., Burmistrov I.N., Panova L.G. Use of modified nanoparticles of potassium polytitanate and physical methods of modification of epoxy compositions for improving their operational properties // *Rus. J. Appl. Chem.* 2015. V. 88. № 1. P. 129–137.
11. Mostovoi A.S. Oligooxypropylene glycol – effective plasticizer for epoxy polymers // *Voprosy materialovedeniya (Topics of Materials Science).* 2015. № 4 (84). P. 117–122. (in Russ.).
12. Mostovoi A. S., Plakunova E. V., Panova L. G. Development of flame retardant epoxy composites and study of their structure and properties // *Perspektivnyye materially (Perspective Materials).* 2014. № 1. P. 37–43. (in Russ.).
13. Mostovoi A.S., Panova L.G., Kurbatova E.A. Modification of epoxy polymers using of silicon-containing filler with the aim of increasing operational proper // *Voprosy materialovedeniya (Topics in Materials Science).* 2016. № 2 (86). P. 87–95. (in Russ.).
14. Shirshova E.S., Tatarinceva E.A., Plakunova E.V., Panova L.G. Study of the effect of modifiers on the properties of epoxy compositions // *Plasticheskie massy (Plastics).* 2006. № 12. P. 34–36. (in Russ.).
15. Eremeeva N.M., Nikiforov A.V., Sveshnikova E.S., Panova L.G. Studying the properties of epoxy compositions based on modified cellulose materials // *Molodoj uchenyj (Young Scientist).* 2015. № 24.1 (104.1). P. 20–23. (in Russ.).
16. Kadykova Yu.A., Ulegin S.V. Directional control of the properties of epoxybasaltoplastics // *Izvestija Volgogradskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta (Bull. of Volgograd State Technical University).* 2015. № 7 (164). P. 130–131. (in Russ.).

18. Бадамшина Э.Р., Гафурова М.П., Эстрин Я.И. Модифицирование углеродных нанотрубок и синтез полимерных композитов с их участием // Успехи химии. 2010. Т. 79 (11). С. 1027–1064.

19. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Юрков Г.Ю. Перспективы использования углеродсодержащих наночастиц в связующих для полимерных композиционных материалов // Рос. нанотехнологии. 2013. Т. 8. № 3–4. С. 24–42.

20. Пыхтин А.А., Симонов-Емельянов И.Д. Технологические свойства нанодисперсий на основе эпоксидного олигомера марки DER-330 и белой сажи марки БС-50 // Тонкие химические технологии. 2016. Т. 11. № 4. С. 63–68.

21. Гавриш В.М., Баранов Г.А., Храброва Е.А., Чайка Т.В., Гавриш О.П. Влияние нанопорошка, полученного из лома твердых сплавов марки ТТК, на эксплуатационные свойства эпоксидного клея // Энергетические установки и технологии. 2016. Т. 2. № 3. С. 64–69.

22. Афанасьева Е.С., Бабкин А.В., Солопченко А.В., Кепман А.В., Эрдни-Горяев Э.М., Кудрин А.М. Механические свойства модифицированных одностенными углеродными нанотрубками эпоксидных связующих для армированных композиционных материалов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 5. С. 10–18.

17. Ulegin S.V., Kadykova Yu.A., Artemenko S.E., Demidova S.A. Epoxy composition materials filled with basalt // Plasticheskie massy (Plastics). 2013. № 2. P. 31–33. (in Russ.).

18. Badamshina E.R., Gafurov M.P., Estrin Ya.I. Modification of carbon nanotubes and synthesis of polymeric composites involving the nanotubes // Uspekhi khimii (Russian Chemical Reviews). 2010. V. 79 (11). P. 1027–1064. (in Russ.).

19. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Yurkov G.Yu. Prospects of using carbonaceous nanoparticles in binders for polymer composites // Rossiyskie nanotekhnologii (Russian Nanotechnologies). 2013. V. 8. № 3-4. P. 28–46. (in Russ.).

20. Pykhtin A.A., Simonov-Emelyanov I.D. Technological properties of nanodispersions based on DER-330 epoxy resin and BS-50 fumed silica // Tonkie khimicheskie tekhnologii (Fine Chemical Technologies). 2016. V. 11. № 4. P. 63–68. (in Russ.).

21. Gavrish V.M., Baranov G.A., Khrabrova E.A., Chajka T.V., Gavrish O.P. The effect of the nanopowder, derived from of TTK brand alloy solid, on the epoxy glue performance properties // Energeticheskie ustanovki i tekhnologii (Energy Plants and Technologies). 2016. V. 2. № 3. P. 64–69. (in Russ.).

22. Afanas'eva E.S., Babkin A.V., Solopchenko A.V., Kepman A.V., Erdni-Goryaev E.M., Kudrin A.M. The mechanical properties of epoxy binder modified with single-walled carbon nanotubes for fiber reinforced composites // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta (Bull. of Voronezh State Technical University). 2016. V. 12. № 5. P. 10–18. (in Russ.).

Об авторах:

Мостовой Антон Станиславович, кандидат технических наук, заведующий лабораторией «Современные методы исследований функциональных материалов и систем», доцент кафедры «Естественные и математические науки», Энгельсский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» (413100, Россия, Саратовская область, г. Энгельс, пл. Свободы, 17).

Таганова Алина Александровна, студентка 3 курса, Энгельсский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» (413100, Россия, Саратовская область, г. Энгельс, пл. Свободы, 17).

Прокопович Ксения Владиславовна, студентка 3 курса, Энгельсский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» (413100, Россия, Саратовская область, г. Энгельс, пл. Свободы, 17).

Яковлева Елена Владимировна, кандидат химических наук, доцент кафедры «Ботаника, химия и экология» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова» (410012, Россия, Саратов, Театральная площадь, 1).

About authors:

Anton S. Mostovoi, Ph.D. (Engineering), Head of the Laboratory "Modern Methods of Research of Functional Materials and Systems", Associate Professor of the Chair of Natural and Mathematical Sciences, Engels Technological Institute (branch) of the Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (17, Svobody Sq., Engels, Saratov region, 413100, Russia).

Alina A. Taganova, Student, Engels Technological Institute (branch) of the Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (17, Svobody Sq., Engels, Saratov region, 413100, Russia).

Ksenia V. Prokopovich, Student, Engels Technological Institute (branch) of the Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (17, Svobody Sq., Engels, Saratov region, 413100, Russia).

Elena V. Yakovleva, Ph.D. (Chemistry), Associate Professor of the Chair of Botany, Chemistry and Ecology, N.I. Vavilov Saratov State Agrarian University (1, Teatralnaya Sq., Saratov, 410012, Russia).