

А.Ю. Полоз ^а, Ю.Р. Эбич ^б, Н.Р. Прокопчук ^с, Р.М. Долинская ^с, В.В. Мозгалева ^с

ОЛИГОМЕРНЫЕ КАУЧУКИ С РЕАКЦИОННОСПОСОБНЫМИ ГРУППАМИ КАК МОДИФИКАТОРЫ ЭПОКСИДНЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ КОМПОЗИЦИЙ

^а ООО «Новые технологии», г. Днепропетровск

^б ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепропетровск

^с Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск

Выполнена оценка влияния олигомерных каучуков с реакционноспособными группами (карбоксильными – СКД–КТР, СКН-10КТР; гидроксильными – СКД–ГТР, СКН-14ГТР, эпоксидными – СКД-0-Э; ацилгидразонными – СКИ-ГЗ), способными взаимодействовать с эпоксидными группами матрицы (смола ЭД-20), на свойства эпоксидных композиций, отверждаемых полиэтиленполиамином (ПЭПА). Показано, что изученные олигомерные каучуки участвуют в формировании сшитой структуры эпоксидных композиций. Участие олигомерных каучуков в реакциях с эпоксидными группами матрицы подтверждено данными ИК-спектроскопии. При введении олигомерных каучуков в эпоксидную матрицу наблюдается увеличение энергии деформирования, обусловленное наличием гибких фрагментов трехмерной сетки вследствие встраивания молекул каучуков. Определен вклад энергии упругого и вязкого деформирования в общую энергию деформирования при абразивном износе эпоксидных композиций под разными углами атаки абразива: при малых углах атаки абразива (15°) композиции с добавками олигомерных каучуков, обладающие большей энергией вязкого деформирования, изнашиваются больше, чем немодифицированная композиция с минимальной энергией вязкого деформирования; более хрупкая немодифицированная композиция подвергается большему износу при углах, близких к 90° по сравнению с модифицированными композициями.

Ключевые слова: эпоксидная смола, олигомерные каучуки, вязкоупругие свойства, баланс упругих и вязкостных характеристик, абразивный износ.

Введение

Перспективным направлением целевого регулирования структуры и свойств эпоксидных композиций является их модификация [1,2] низковязкими моно-, полиэпоксидными соединениями линейной и разветвленной структуры [3,4], олигоэфирами с концевыми циклокарбонатными группами [4] и олигокарбонатами [5], олигомерными каучуками [6], нанодисперсными наполнителями [7] и др.

В обзорной статье [6] дан глубокий анализ термодинамических и кинетических особенностей формирования сетчатых полимеров на основе эпоксидных олигомеров, модифицированных олигомерными каучуками. Однако в настоящее время отсутствуют сведения о сравнительном влиянии олигомерных каучуков на эксплуатационные свойства эпоксидных полимеров, их использование в практических составах. В большей мере это относится к клеевым эпоксидным композициям [8–10] и практически отсутствуют

данные применения олигомерных каучуков в износостойких эпоксидных композициях.

В случае износостойких эпоксидных композиций образование смешанной трехмерной структуры, содержащей жесткие густосетчатые фрагменты полиэпоксида и эластичные фрагменты олигомерных каучуков, позволит регулировать их физико-механические и вязкоупругие свойства, износостойкость в результате действия под разными углами абразивных сред при эксплуатации песковых насадок гидроциклонов [11] и других элементов различного оборудования.

В этой связи целью данной работы явилось установление влияния различных функциональных групп в структуре олигомерных каучуков, способных взаимодействовать с эпоксидными группами матрицы, на эксплуатационные свойства модифицированных эпоксидных композиций.

Экспериментальная часть

Наиболее широко в промышленном про-

изготовлении используются диановые эпоксидные олигомеры, отверждаемые полиаминами по энергосберегающей технологии при обычной температуре (20°) в течение 24 ч с последующим доотверждением при 80–120°С для более полного участия эпоксидных групп в формировании трехмерной структуры. Данная реакция отверждения является экзотермической, параметры которой будут зависеть от применяемого олигомерного каучука; выделяемое тепло будет определять не только жизнеспособность композиций, но и влиять на процессы гелеобразования и формирование трехмерной структуры.

Для исследования использовали в качестве эпоксидной матрицы диановую смолу ЭД-20 – ГОСТ 10587-84 ($\bar{M}_n=390$, содержание эпоксидных групп 21,2 мас.%), а в качестве модификаторов олигомерные каучуки: с концевыми карбоксильными группами – СКД-КТР, ($\bar{M}_n=3000$, содержание концевых –СООН групп 2,9 мас.%); СКН-10 КТР ($\bar{M}_n=3000$, содержание акрилонитрила 10,2 мас.%, концевых –СООН групп 2,9 мас.%); с концевыми гидроксильными группами – СКД-ГТР ($\bar{M}_n=3000$, содержание концевых –ОН групп 2,8 мас.%), СКН-14ГТР ($\bar{M}_n=3000$, содержание акрилонитрила 14,0 мас.%, концевых –ОН групп 1,3 мас.%); с концевыми ацилгидразонными группами – СКИ-ГЗ ($\bar{M}_n=3000$, содержание ацилгидразонных групп 6,4 мас.%); эпоксициклогидрат олигобутадиена – СКД-О-Э ($\bar{M}_n=4500$, содержание эпоксидных групп 3,4 мас.%).

Эпоксидную смолу ЭД-20 смешивали с 10 мас.ч. на 100 мас.ч. смолы олигомерных каучуков в течение 10–15 мин, после чего вводили отвердитель – полиэтиленполиамин (ПЭПА) в количестве 10 мас.ч. на 100 мас.ч. смолы. Отверждение композиций осуществляли по режиму: 20°С×24 ч+100°С×3 ч. Использовали наполненные композиции для исключения влияния наполнителей и других добавок на формируемую трехмерную структуру и эксплуатационные свойства.

Физико-механические испытания отвержденных блочных образцов проводили согласно действующим стандартам. Вязкоупругие свойства эпоксидных композиций при динамических условиях определяли при 22±2°С с помощью прибора ИПМ-1К, разработанного в НАН Беларуси с применением соответствующих математических зависимостей. Метод динамического индентирования, используемый в приборе, заключается в нанесении удара посредством жесткого индентора по испытываемому образцу в однократном импульсном режиме [12]. При импульсном нагружении композит проявляет вязкоупругие свойства, которые невозможно

оценить при статическом воздействии; кроме того, динамическое нагружение моделирует наиболее жесткие условия, которым может подвергаться композиционный материал в процессе эксплуатации. Вязкоупругие свойства характеризовали с использованием моделей Максвелла и Кельвина-Фойхта. Модель Максвелла в первом приближении описывает релаксацию упругого тела, а модель Кельвина-Фойхта – его ползучесть.

Износостойкость композиций оценивали в условиях жесткого газоабразивного износа потоком песка с размерами частиц 0,5–0,9 мм при скорости 76 м/с согласно ГОСТ 23.201-78 на центробежном ускорителе твердых частиц ЦУК-3 под разными углами атаки абразива: 15°, 30°, 45°, 60° и 90°.

Формирование сетчатой структуры модифицированных эпоксидных композиций характеризовали содержанием золь-фракции (S), определяемой после кипячения в аппарате Сокслета в течение 6 ч, коэффициентом сшивания γ , рассчитываемым по формуле [13]:

$$\gamma=(1/S^{0.5}-1)/(1-S).$$

Об участии функциональных групп каучуков в формировании трехмерной сетки судили по данным ИК-спектроскопии. ИК-спектры снимали на ИК-спектрометре NEXUS-670 (детектор DTGS) с использованием таблетки, включающей 0,5 мг исследуемой композиции, смешанной с 250 мг КВг. ИК-спектры снимали при пропускании в интервале 400–4000 см⁻¹ с разрешением 4 см⁻¹.

Результаты и их обсуждение

Согласно данным, представленным в табл. 1, олигомерные каучуки участвуют в формировании сшитой структуры эпоксидных композиций с несколько большей степенью сетчатости по сравнению с немодифицированной композицией, о чем свидетельствует уменьшение содержания золь-фракции в отвержденных образцах и увеличение коэффициента сшивания (табл. 1). Результаты ИК-спектроскопии (рисунок), в которых обсуждены только изменения, связанные с добавками олигомерных каучуков, соответствуют данным золь-гель анализа: во всех отвержденных композициях практически отсутствует полоса 913–914 см⁻¹ колебаний эпоксидного кольца, т.е. почти все эпоксидные группы исчезли.

В ИК-спектрах композиций с карбоксилатными каучуками наблюдается отсутствие полосы поглощения карбонила в карбоксильной группе каучука 1708 см⁻¹ и появляется полоса 1736 см⁻¹, относящаяся к колебаниям сложноэфирной группы –COOR. В композициях с гид-

Таблица 1

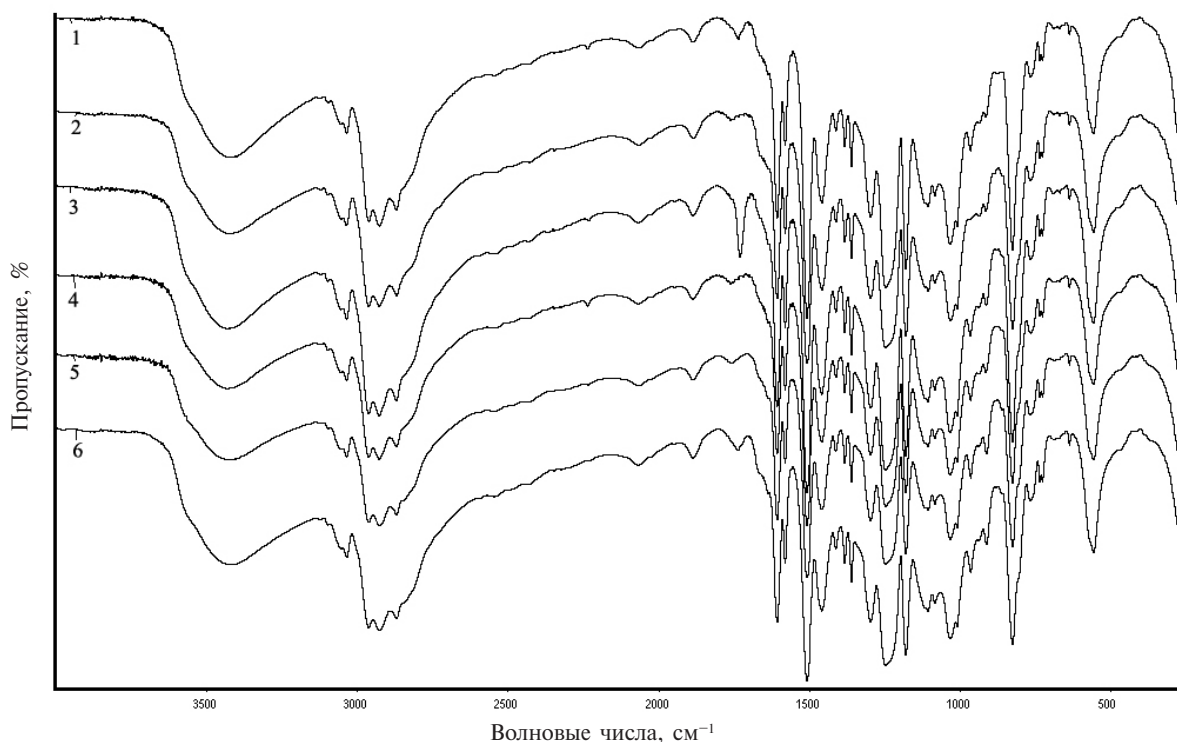
Влияние олигомерных каучуков на свойства эпоксидных композиций на основе смолы ЭД-20

Олигомерный каучук	Содержание золь-фракции, мас. %	Коэффициент сшивания γ	Износ ($\Delta V \cdot 10^3, \text{см}^3$) при углах атаки абразива				Ударная вязкость, кДж/м ²	Прочность при изгибе, МПа	Прочность при растяжении, МПа	Относительная деформация при разрыве, %	Прочность при сжатии, МПа	
			15 ⁰	30 ⁰	45 ⁰	60 ⁰						90 ⁰
Без каучука	0,24	19,4	4,5	10,8	16,1	14,7	12,9	7,2	84	21,6	7,3	142
СКН-10КТР	0,14	25,4	5,4	16,2	17,0	15,1	11,0	16,8	160	32,5	16,7	212
СКИ-ГЗ	0,17	23,5	6,0	16,1	20,8	16,4	10,9	16,1	145	29,9	14,2	194
СКД-0-Э	0,12	27,5	7,4	18,0	18,5	16,4	10,2	10,0	82	24,0	13,2	138
СКН-14ГТР	0,21	20,9	6,9	17,6	22,8	16,7	10,5	15,1	120	28,0	13,7	168
СКД-ГТР	0,22	20,3	8,0	18,8	25,4	19,0	11,3	10,7	89	26,9	13,4	137
СКД-КТР	0,22	20,3	10,2	19,1	25,5	19,1	11,4	10,1	86	26,1	12,7	138

Таблица 2

Вязкоупругие свойства эпоксидных композиций на основе смолы ЭД-20, модифицированных олигомерными каучуками

Олигомерный каучук	Динамический модуль упругости $M_d \cdot 10^{-10}, \text{Па}$	Тангенс угла механических потерь $\text{tg}\delta$	Энергия деформирования $E_d \cdot 10^3, \text{Дж}$	Энергия упругого деформирования $E_y \cdot 10^4, \text{Дж}$	Энергия вязкого деформирования $E_v \cdot 10^4, \text{Дж}$	Вязкость по модели Кельвина-Фойхта, Н·с	Вязкость по модели Максвелла, Н·с
СКН-10КТР	1,05	0,121	1,11	5,69	5,41	7,30	447,9
СКИ-ГЗ	0,98	0,126	1,16	5,29	6,31	7,15	405,9
СКД-0-Э	0,94	0,136	1,11	4,25	6,85	7,85	527,8
СКН-14ГТР	1,11	0,118	1,08	5,11	5,69	7,77	482,3
СКД-ГТР	1,06	0,113	1,10	5,06	5,94	6,02	520,1
СКД-КТР	0,89	0,120	1,11	5,06	6,04	5,81	499,6



ИК-спектры эпоксидных композиций, отвержденных полиэтиленполиамином, с добавками олигомерных каучуков: 1 – СКН-10 КТР; 2 – СКИ-ГЗ; 3 – СКД-КТР; 4 – СКН-14 ГТР; 5 – СКД-ГТР; 6 – СКД-0-Э

роксилсодержащими каучуками появляется полоса в области 1084 см^{-1} , относящаяся к колебаниям простой эфирной связи $-\text{C}-\text{O}-\text{C}-$.

Участие ацилгидразонных групп каучука СКИ-ГЗ в реакциях отверждения проследить сложно вследствие того, что образующиеся при взаимодействии первичных аминогрупп ПЭПА с эпоксидными группами смолы вторичные аминогруппы, имеющиеся в каучуке, участвуют в последующих реакциях с эпоксидными группами смолы.

Введение олигомерных каучуков в эпоксидную матрицу влияет на соотношение вязкоупругих характеристик рассмотренных эпоксидных композиций, комплекс их эксплуатационных свойств (табл. 1,2). С ростом вклада энергии вязкого деформирования в общую энергию деформирования, наблюдаемую при введении олигомерных каучуков, возрастают ударная вязкость эпоксидных композиций, их прочность при растяжении с одновременным увеличением относительной деформации при разрыве (табл. 1). Введение олигомерных каучуков СКН-10КТР и СКИ-ГЗ приводит также к значительному увеличению прочности при изгибе и сжатии. Следует отметить общую зависимость абразивного износа эпоксидных композиций от угла атаки абразива: при малых углах атаки абразива (15°) композиции с добавками олигомерных каучуков, обладающие большей энергией вязкого деформирования, изнашиваются больше, чем не-

модифицированная композиция с минимальной энергией вязкого деформирования; более хрупкая немодифицированная композиция подвергается большему износу при углах, близких к 90° по сравнению с модифицированными композициями. Максимальный износ для всех композиций наблюдается при 45° .

Такая зависимость износа других эпоксидных композиций от угла атаки абразива, связанная с упруго-вязкостным переходом, отмечена в [14]. Согласно [14] с учетом полученных экспериментальных данных влияние баланса упругих и вязкостных характеристик эпоксидных композитов на их износ объясняется следующим образом. При вертикальном воздействии потока абразивных частиц материал деформируется. Пока деформация не превышает порогового значения, ударяющие частицы за счет упругости материала отскакивают и практически ничего не происходит. Если деформация выше порогового значения, то образующаяся маленькая вертикальная трещина может увеличиваться под воздействием «вдавливания» (сдвиг материала при ударе) при возрастающей вертикальной нагрузке на материал. Как только вся энергия частицы будет передана материалу, вертикальная нагрузка уменьшится, и трещина за счет вязкостных свойств будет стремиться к закрытию. Однако частица все еще находится в трещине и теперь у верхнего конца вертикальной трещины появляется вокруг частицы гори-

зонтальная трещина, распространяющаяся по поверхности. Далее это может привести к отделению значительного количества материала. При увеличении энергии вязкого деформирования в модифицированных олигомерными каучуками эпоксидных композициях образующаяся горизонтальная трещина гасится вследствие диссипации энергии деформирования эластичными фрагментами трехмерной сетки.

При введении олигомерных каучуков в эпоксидную матрицу существенно уменьшается динамический модуль упругости и наблюдается увеличение энергии деформирования (табл. 2), обусловленное наличием гибких фрагментов трехмерной сетки вследствие встраивания молекул каучуков. Уменьшение вязкости композиций, рассчитанное по модели Максвелла, способствует облегчению протекания релаксационных процессов в композициях, более равномерному распределению напряжений при деформации и существенному повышению их ударной вязкости и других характеристик. Механические потери при деформации ($tg\delta$) модифицированных композиций возрастают, что обусловлено неравномерностью распределения гибких фрагментов в сформированной трехмерной сетке.

Выводы

Олигомерные каучуки с функциональными группами, способными реагировать с эпоксидными группами смолы ЭД-20, участвуют в формировании пространственной структуры модифицированных эпоксидных композиций при отверждении полиэтиленполиамином, что способствует вкладу энергии вязкого деформирования в общую энергию деформирования, росту ударной вязкости, прочности при растяжении и относительной деформации при разрыве.

Установлена зависимость износа модифицированных олигомерными каучуками эпоксидных композиций от угла атаки абразива, связанная с упруго-вязкостным переходом, и показано, что композиции с большей энергией вязкого деформирования больше изнашиваются при малых углах атаки абразива, с большей энергией упругого деформирования — при углах атаки абразива, близких к 90° .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Epoxy polymers: new materials and innovations* / Ed. by J.-P. Pascault and R.J.J. Williams. — Wiley VCH, 2010. — 367 p.
2. Хозин В.Г. Усиление эпоксидных полимеров. — Казань: ПИК «Дом печати», 2004. — 446 с.
3. Жаворонок Е.С., Чалых А.Е., Колесникова Е.Ф. Влияние природы и функциональности эпоксидных олигомеров на реокинетику их отверждения // Пластические массы. — 2013. — № 4. — С.16-20.
4. Антипова Е.А., Короткова Н.П., Лебедев В.С. Современные полиуретановые, эпоксидные, ПУ-акрилатные и эпоксиакрилатные связующие для промышленных ЛКМ производства ООО «НПП» «Макромер» // Лакокрасочные материалы и их применение. — 2012. — № 9. — С.14-21.
5. Григоренко Т.И. Олигокарбонаты - эффективные модификаторы эпоксидных смол // Вопр. химии и хим. технологии. — 2009. — № 6. — С.63-67.
6. Фазовая структура эпоксидно-каучуковых систем / Волков В.П., Рогинская Г.Ф., Чалых А.Е., Розенберг Б.А. // Успехи химии. — 1982. — Т.51. — №10. — С.1733-1752.
7. Регулирование свойств наполненных эпоксидных олигомеров / Осипова П.В., Осипчик В.С., Смотров С.А., Савальев Д.Н. // Пластические массы. — 2011. — № 4. — С.3-5.
8. Эпоксидные олигомеры и клеевые композиции / Зайцева Ю.С., Кочергин Ю.С., Пактер Н.К., Кучер Р.В. — К.: Наукова думка, 1990. — 200 с.
9. Кочергин Ю.С., Кулик Т.А., Григоренко Т.И. Эпоксидные клеи специального назначения // Клеи, герметики, технологии. — 2006. — № 3. — С.3-7.
10. Пиріков О., Лойко Д. Вплив рідкого каучуку на споживчі властивості епоксидних клейових композицій // Товари і ринки. — 2008. — № 1. — С.113-122.
11. Газоабразивне зношування епоксидних композитів / Полоз О.Ю., Липицкий С.Г., Кущенко С.М., Семенец О.А., Эбич Ю.Р. // Вопр. химии и хим. технологии. — 2012. — № 1. — С.75-80.
12. Крень А.П., Рудницкий В.А., Дейкун И.Г. Определение вязкоупругих параметров резин методом динамического индентирования с использованием нелинейной модели деформирования // Каучук и резина. — 2004. — № 6. — С.19-23.
13. Исследование влияния полисульфидных олигомеров в составе композиций на основе олигоакрилатов на процесс структурообразования и свойства материалов / И.А. Новаков, А.Е. Чалых, А.В. Нистратов, В.И. Фролова, Р.Р. Хасбиуллин, В.В. Климов // Пластические массы. — 2011. — № 6. — С.18-22.
14. Ягер М., Готье К. Абразивный износ — неразрешимая проблема? // Композитный мир. — 2010. — № 2(29). — С.6-15.

Поступила в редакцию 11.12.2015

OLIGOMERIC RUBBERS WITH REACTIVE GROUPS AS MODIFIERS OF WEAR-RESISTANT EPOXY COMPOSITIONS

A.Yu. Poloz ^a, Yu.R. Ebich ^b, N.R. Prokopchuk ^c, R.M. Dolinskaya ^c, V.V. Mozgalev ^c

^a New Technologies, Ltd, Dnepropetrovsk, Ukraine

^b Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnepropetrovsk, Ukraine

^c Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus

The influence of oligomeric rubbers with reactive groups, such as carboxylic, hydroxyl, epoxy, and acylhydrazone ones, which can interact with epoxy groups of the ED-20 resin matrix, on the properties of the epoxy compositions cured by polyethylenepolyamine was evaluated. The investigated oligomeric rubbers participate in forming the cross-linked structure of epoxy compositions. When oligomeric rubbers have been added in the epoxy matrix, an increase in the energy of deformation was observed which is caused by the presence of flexible fragments of three-dimensional network due to the incorporation of rubbers molecules. The contribution of energies of elastic and viscous deformations to the total energy of deformation was determined at abrasive damage of epoxy compositions at different angles of attack of the abrasive.

Keywords: epoxy resin; oligomeric rubbers; viscoelastic properties; ratio between elastic and viscous characteristics; abrasive wear.

REFERENCES

1. Pascault J.-P., Williams R.J.J., *Epoxy polymers: new materials and innovations*. Wiley-VCH, Weinheim, 2010. 367 p.
2. Hozin V.G., *Usileniye epoksidnykh polimerov* [Strengthening of epoxy polymers]. PIK Dom Pechati Publishers, Kazan', 2004. 446 p. (in Russian).
3. Zhavoronok E.S., Chalykh A.E., Kolesnikova E.F. Vliyaniye prirody i funktsional'nosti epoksidnykh oligomerov na reo-kinetiku ikh otverzhdeniya [The influence of the nature and functionality of epoxy oligomers on the reo-kinetics of their curing]. *Plasticheskie Massy*, 2013, vol. 4, pp. 16-20. (in Russian).
4. Antipova E.A., Korotkova N.P., Lebedev V.S. Sovremennyye poliuretanovyie, epoksidnyie, PU-akrilatnyie i epoksiakrilatnyie svyazyushchie dlya industrial'nykh LKM proizvodstva OOO «NPP» «Makromer» [Modern polyurethane, epoxy, PU-acrylate and epoxy acrylate binders for industrial coatings produced by «Macromer», Ltd]. *Lakokrasochnyye Materialy i ikh Primeneniye*, 2012, vol. 9, pp. 14-21. (in Russian).
5. Grigorenko T.I. Oligokarbonaty – effektivnyie modifikatory epoksidnykh smol [Oligocarbonates as effective modifiers of epoxy resins]. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2009, vol. 6, pp. 63-67. (in Russian).
6. Volkov V.P., Roginskaya G.F., Chalykh A.E., Rozenberg B.A. Fazovaya struktura epoksidno-kauchukovykh sistem [The phase structure of epoxy-rubber systems]. *Uspekhi Khimii*, 1982, vol. 51, no. 10, pp. 1733-1752. (in Russian).
7. Osipova P.V., Osipchik V.S., Smotrova S.A., Saval'ev D.N. Regulirovaniye svoystv napolnennykh epoksidnykh oligomerov [Adjustment of properties of filled epoxy oligomers]. *Plasticheskie Massy*, 2011, vol. 4, pp. 3-5. (in Russian).
8. Zaitseva Yu.S., Kochergin Yu.S., Pakter N.K., Kucher R.V., *Epoksidnyie oligomery i kleevyie kompozitsii* [Epoxy oligomers and adhesive compositions]. Naukova dumka, Kyiv, 1990. 200 p. (in Russian).
9. Kochergin Yu.S., Kulik T.A., Grigorenko T.I. Epoksidnyie klei spetsial'nogo naznacheniya [Epoxy adhesives for special purposes]. *Klei, Germetiki, Tekhnologii*, 2006, vol. 3, pp. 3-7. (in Russian).
10. Pyrikov O., Loiko D. Vplyv ridkogo kauchuku na spozhyvchi vlastyivosti epoksidnykh kleyovykh kompozitsii [Influence of liquid rubber on consumer properties of epoxy adhesive compositions]. *Tovary i Rynky*, 2008, vol. 1, pp. 113-122. (in Ukrainian).
11. Poloz O.Yu., Lipits'kii S.G., Kushchenko S.M., Semenets' O.A., Ebich Yu.R. Gazoabrazivnye znoshuvann'ya epoksidnykh kompozitiv [Gas abrasive wear of epoxy composites]. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2012, vol. 1, pp. 75-80. (in Ukrainian).
12. Kren' A.P., Rudnitskii V.A., Deikun I.G. Opredeleniye vyazkoupругikh parametrov rezin metodom dinamicheskogo indentirovaniya s ispol'zovaniem nelineinoy modeli deformirovaniya [Defining of parameters of viscoelastic rubber by means of the method of dynamic indentation using a nonlinear model of the deformation]. *Kauchuk i Rezina*, 2004, vol. 6, pp. 19-23. (in Russian).
13. Novakov I.A., Chalykh A.E., Nistratov A.V., Frolova V.I., Hasbiullin R.R., Klimov V.V. Issledovaniye vliyaniya polisulfidnykh oligomerov v sostave kompozitsii na osnovе oligoakrilatov na protsess strukturoobrazovaniya i svoystva materialov [Investigation of the effect of polysulfide oligomers in the compositions based on polyacrylate on the process of structure formation and properties of materials]. *Plasticheskie Massy*, 2011, vol. 6, pp. 18-22. (in Russian).
14. Jager M., Got'e K. Abrazivnyi iznos – nerazreshimaya problema? [Is abrasion wear an insoluble problem?]. *Kompozitnyi Mir*, 2010, vol. 2, pp. 6-15. (in Russian).