

DOI: 10.15593/2224-9877/2017.3.01

УДК 05.02.00

**Е.М. Готлиб<sup>1</sup>, Э.Р. Галимов<sup>2</sup>, А.Р. Хасанова<sup>2</sup>, Е.С. Ямалеева<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Казанский национальный исследовательский  
технологический университет, Казань, Россия<sup>2</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

## **АНТИФРИКЦИОННЫЕ ЭПОКСИДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, НАПОЛНЕННЫЕ АКТИВИРОВАННЫМ ВОЛЛАСТОНИТОМ**

Проведены исследования антифрикционных свойств композиционных материалов на основе эпоксидных связующих. Для получения модифицированных композиций использовалась эпоксидная диановая смола ЭД-20 (ГОСТ 10587–84). В качестве сшивающих агентов для холодного отверждения использовался аминоалкилфенол (АФ-2) (ТУ 2494-052-00205423–2004), а для горячего отверждения – гексаметилендиамин (ГМДА) (ТУ 6-09-36–73). В качестве наполнителя применялся волластонит марки «Миволл 10-97» (ТУ 577-006-40705684–2003) отечественного производства ЗАО «Геоком» с характеристическим отношением длины к диаметру зерен 15:1. Для активации поверхности волластонита использовались поверхностно-активные вещества. Изучено влияние структуры аминного отвердителя, а также типа поверхностно-активных веществ, которые применялись для активации поверхности минерального наполнителя на износостойкость, твердость и коэффициент статического трения эпоксиполимеров. Испытания проводились на автоматизированной машине трения Tribometer, CSM Instruments (Швейцария). Методом Барколя изучено влияние модификации эпоксидных композиций поверхностно-активированным волластонитом на твердость эпоксиполимера. Износостойкость образцов из эпоксидной композиции измерялась на вертикальном оптиметре ИЗВ-1 с точностью  $\pm 0,001$  мм. Таким образом, разработаны составы антифрикционных материалов на основе эпоксидных смол, модифицированных поверхностно-активированным волластонитом, представлены результаты исследования влияния поверхностно-активных веществ на модифицирующие действия волластонита. Установлено, что активация поверхности природного волластонита обуславливает улучшение ряда антифрикционных свойств наполненных им эпоксидных материалов. Причем более значительное повышение твердости и износостойкости наблюдается при отверждении гексаметилендиамином, а при отверждении АФ-2 снижается также коэффициент статического трения. При этом более перспективно использование алкилтриметиламоний хлорида с более длинным алкильным радикалом.

**Ключевые слова:** эпоксидные полимеры, аминные отвердители, волластонит, износостойкость, твердость по Барколю, антифрикционные свойства, коэффициент статического трения, наполнитель, поверхностно-активные вещества, модификация.

**E.M. Gotlib<sup>1</sup>, E.R. Galimov<sup>2</sup>, A.R. Khasanova<sup>2</sup>, E.S. Yamaleeva<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian Federation

<sup>2</sup> Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,  
Kazan, Russian Federation

## **ANTIFRICTION EPOXY MATERIALS FILLED WITH ACTIVATED WOLLASTONITE**

Studies of the antifriction properties of composite materials based on epoxy binders have been carried out. To prepare the modified compositions, an epoxy diene resin ED-20 (GOST 10587-84) was used. As cross-linking agents for cold curing, aminoalkylphenol (AF-2) (TU 2494-052-00205423-2004) was used, and hexamethylenediamine (HMDA) (TU 6-09-36-73) for hot curing. As the filler, wollastonite Brand MiVoll 10-97 (TU 577-006-40705684-2003) of domestic production of CJSC Geokom with a characteristic ratio of length to grain diameter of 15:1. Surface-active substances (surfactants) were used to activate the surface of wollastonite. The influence of the amine hardener structure and the type of surfactants used to activate the surface of the mineral filler on the wear resistance, hardness, and static friction coefficient of epoxy polymers was studied. The tests were carried out on an automated friction machine "Tribometer, CSM Instruments" (Switzerland). The effect of the modification of epoxy compositions with surface-activated wollastonite on the hardness of epoxy polymers has been studied by the method of Barkol. The wear resistance of samples from the epoxy composition was measured on a vertical optical meter IZV-1 with an accuracy of  $\pm 0.001$  mm. Thus, the compositions of antifriction materials based on epoxy resins modified with surface-activated wollastonite have been developed, the results of the study of the effect of surfactants on the modifying effects of wollastonite are presented. It was found that activation of the surface of natural wollastonite causes an improvement in the number of antifriction properties of epoxy materials filled with it. Moreover, a more significant increase in hardness and wear resistance is observed when cured with hexamethylenediamine, and when the AF-2 cures, the static friction coefficient also decreases. At the same time, it is more promising to use alkyltrimethylammonium chloride with a longer alkyl radical.

**Keywords:** epoxy polymers, amine hardeners, wollastonite, abrasion resistance, Barcola hardness, antifriction properties, friction coefficient, filler, surfactants, modification.

### **Введение**

К антифрикционным эпоксидным материалам для машиностроения предъявляются следующие требования: низкий коэффициент трения, отсутствие в составе дорогих компонентов, способность быстро прирабатываться и иметь низкий износ, высокая тепло-, водостойкость, нетоксичность и безопасность в пожарном отношении, высокие прочность и твердость [1].

Исходя из этого в их рецептуре перспективно применять в качестве наполнителя волластонит, обладающий целым рядом ценных свойств, а именно: низкими значениями коэффициента водопоглощения, диэлектрической постоянной, вязкости, высокими износо- и термостойкостью. Это обусловлено его микроармирующими свойствами за счет игольчатой формы частиц [2]. Кроме того, волластонит имеет

высокую твердость, низкую токсичность и невысокую стоимость. Его успешно используют в рецептуре антифрикционных эпоксидных материалов [3].

Для увеличения эффективности взаимодействия на межфазной границе полимер – наполнитель традиционным является использование поверхностно-активных веществ (ПАВ) для активации поверхности минеральных твердых добавок [4]. Обработка наполнителей ПАВ значительно улучшает их диспергирование в полимерной матрице и повышает степень совместимости компонентов.

Одними из распространенных видов ПАВ, применяемых для активации поверхности минеральных наполнителей, в том числе и волластонита, являются органосиланы [5].

Большой интерес в качестве катионных ПАВ для модификации поверхности волластонита представляют четвертичные аммонийные соли [6]. Соли четвертичных аммониевых оснований с углеводородными радикалами  $C_{12}$ – $C_{18}$  отличаются высокой поверхностной активностью как в кислой, так и в щелочной средах, а также хорошей совместимостью с веществами разной природы [7, 8].

### **Экспериментальная часть**

Антифрикционные материалы получали на основе диановой эпоксидной смолы ЭД-20 (ГОСТ 10587–84). В качестве сшивающих агентов использовались для холодного отверждения аминоалкилфенол (АФ-2) (ТУ 2494-052-00205423–2004), горячего – гексаметилендиамин ГМДА (ТУ 6-09-36–73).

Как наполнитель использовался природный волластонит марки «Миволл 10-97» (метасиликат кальция ( $CaSiO_3$ )) (ТУ 577-006-40705684–2003).

Дозировка отвердителя определялась исходя из эквимольного соотношения эпоксидных и аминных групп.

В качестве ПАВ применялись четвертичные аммонийные соли (ЧАС) (ТУ 2482-004-04706205–2005 с изм. № 1–5) производства ООО «Научно-производственное объединение НИИПАВ» (г. Волгодонск), а именно: цетилтриметиламмоний хлорид 50%-ный раствор в изопропиноле АЛКАПАВ 16С.50, алкилтриметиламмоний хлорид 50%-ный раствор в изопропиноле с различной длиной алкильного ра-

дикала – АЛКАПАВ 1214С.50 (алкил 12–14) и АЛКАПАВ 1618С.50 (алкил 16–18).

Для определения износостойкости эпоксидной композиции применяли установку для испытания материалов на истирание [9]. В качестве контртела использовали бруски из инструментальной стали ХВГ, закаленной до твердости HRC 60–64. Были приняты следующие режимы испытания: удельное давление контртела на испытываемую поверхность образца  $p = 1$  МПа, скорость скольжения  $v_{ск} = 1$  м/с, без смазки. Износостойкость образцов из эпоксидной композиции измерялась на вертикальном оптиметре ИЗВ-1 с точностью  $\pm 0,001$  мм.

Антифрикционные свойства определялись на автоматизированной машине трения Tribometer, CSM Instruments (Швейцария), управляемой компьютером, по стандартной схеме испытания шарик – диск (ASTM G99–959, DIN50324 и ISO 20808). Линейная скорость при испытании составляла 8,94 см/с, частота выборки 10 Гц, температура 25 °С, влажность 20 %.

Твердость определялась по методу Барколя в модификации «ТПБа» путем внедрения на образец твердосплавного стержня с углом 26° при вершине и минимальным диаметром 0,157 мм (ГОСТ 9013–59, ASTM B648-2000, ASTM D-2583). Суть метода заключается в определении глубины вдавливания стальной иглы в исследуемую поверхность под действием пружины и сравнении ее с твердостью стандартной плиты [10, 11].

### **Обсуждение результатов**

Срок службы антифрикционных эпоксидных материалов в узлах трения существенно зависит от износостойкости связующего, на которую влияют как тип отвердителя, так и содержание и активность наполнителя.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что изнашивание эпоксидных композитов с волластонитом существенно уменьшается в результате обработки этого наполнителя исследованными ПАВ (табл. 1, рис. 1 и 2). При этом работоспособность антифрикционных эпоксидных материалов определяется структурой ЧАС, в частности количеством углеродных атомов в их основной цепи. Наблюдается четкая закономерность, что с ростом длины алкильного ра-

дикала ПАВ износ наполненных активированным волластонитом оксидных материалов закономерно уменьшается [12, 13].

Таблица 1

Износостойкость оксидных материалов

Отвердитель	Тип ПАВ	Износ, $\times 10^{-6}$ м
АФ-2	без наполнителя	19
	неактивированный волластонит	12
	АЛКАПАВ 1214С.50	16
	АЛКАПАВ 1618С.50	11
	АЛКАПАВ 16С.50	13
ГМДА	без наполнителя	27
	неактивированный волластонит	15
	АЛКАПАВ 1214С.50	12
	АЛКАПАВ 1618С.50	9
	АЛКАПАВ 16С.50	13

*Примечание.* Содержание волластонита составляет 10 мас. ч на 100 мас. ч ЭД-20.

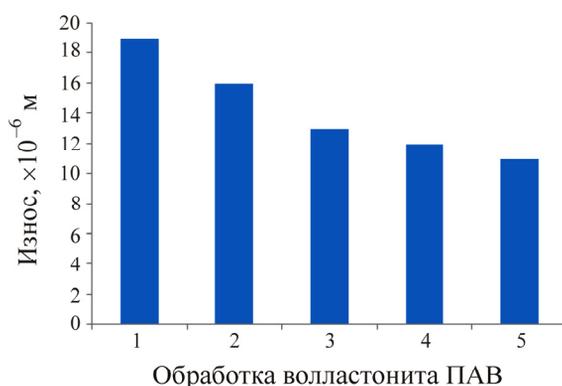


Рис. 1. Зависимость износостойкости оксидных материалов, отвержденных АФ-2, от структуры используемых для обработки волластонита ПАВ: 1 – без наполнителя; 2 – волластонит (АЛКАПАВ 1214С.50); 3 – волластонит (АЛКАПАВ 1618С.50); 4 – волластонит (АЛКАПАВ 16С.50); 5 – волластонит

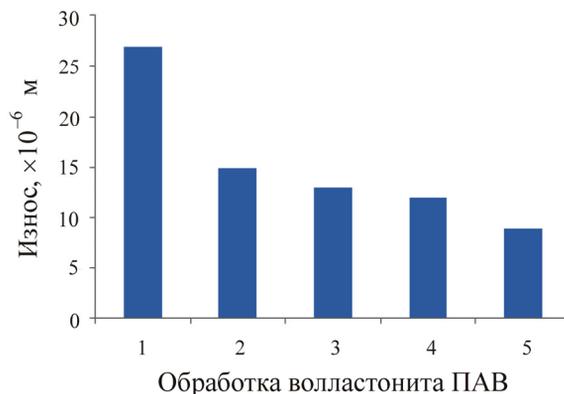


Рис. 2. Зависимость износостойкости эпоксидных материалов, отвержденных ГМДА, от структуры используемых для обработки волластонита ПАВ: 1 – без наполнителя; 2 – волластонит (АЛКАПАВ 1214С.50); 3 – волластонит (АЛКАПАВ 1618С.50); 4 – волластонит (АЛКАПАВ 16С.50); 5 – волластонит

Этот эффект наблюдается при отверждении обоими типами исследованных аминов. При этом износостойкость материалов существенно ниже при отверждении ГМДА. Это может быть связано с более низкой прочностью отверждаемых им эпоксидных композиций вследствие введения этого отвердителя в растворе пластификатора ЭДОС.

Из литературных данных известно, что пластификаторы увеличивают износ эпоксидных материалов [14, 15]. Кроме того, интересно отметить, что степень снижения износа при использовании активированного волластонита значительно больше при применении в качестве сшивающего агента гексаметилендиамина. Так, при использовании АЛКАПАВ 1618С.50 износ эпоксидных материалов с ГМДА уменьшается в три раза (см. рис. 2).

В то же время активация поверхности волластонита ЧАС не оказывает положительного влияния на коэффициент статического трения этих эпоксидных композиций (рис. 3) независимо от длины алкильного радикала используемых ПАВ. Наоборот, коэффициент статического трения при обработке поверхности волластонита исследованными ЧАС увеличивается.

При применении в качестве отвердителя аминифенола АФ-2 активация поверхности волластонита АЛКАПАВ 1618С.50 и АЛКАПАВ 16С.50 почти вдвое снижает этот важный показатель качества антифрикционных материалов.

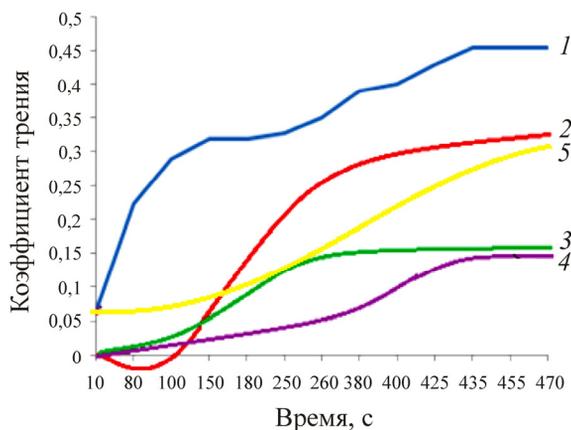


Рис. 3. Зависимость коэффициента статического трения от времени формирования контакта с эпоксиполимером, отвержденным АФ-2, и наполненным 10 мас. ч волластонита: 1 – без наполнителя; 2 – волластонит (АЛКАПАВ 1214С.50); 3 – волластонит (АЛКАПАВ 1618С.50); 4 – волластонит (АЛКАПАВ 16С.50); 5 – волластонит

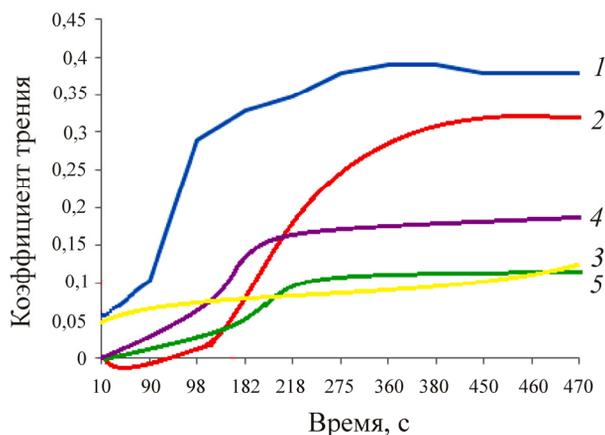


Рис. 4. Зависимость коэффициента статического трения от времени формирования контакта с эпоксиполимером, отвержденным ГМДА и наполненным 10 мас. ч волластонита: 1 – без наполнителя; 2 – волластонит (АЛКАПАВ 1214С.50); 3 – волластонит (АЛКАПАВ 1618С.50); 4 – волластонит (АЛКАПАВ 16С.50); 5 – волластонит

Обработка волластонита ЧАС увеличивает твердость наполненных им эпоксидных композиций по сравнению с использованием в рецептуре природного метилсиликата кальция. Этот эффект наблю-

дается при отверждении как ГМДА, так и АФ-2 (табл. 2). Причем он существенно выше при применении гексаметилендиамина. Наибольший рост твердости, независимо от структуры аминного сшивающего агента, имеет место при использовании АЛКАПАВ 16С.50.

Таблица 2

Твердость эпоксидных материалов, наполненных  
10 мас. ч. волластонита

Отвердитель	Тип ПАВ	Твердость, НВ
АФ-2	без наполнителя	30,8
	неактивированный волластонит	41,4
	АЛКАПАВ 1214С.50	43
	АЛКАПАВ 1618С.50	44
	АЛКАПАВ 16С.50	45,6
ГМДА	без наполнителя	9,8
	неактивированный волластонит	17,2
	АЛКАПАВ 1214С.50	24,2
	АЛКАПАВ 1618С.50	18,6
	АЛКАПАВ 16С.50	32,6

### Заключение

Активация поверхности природного волластонита ПАВ класса четвертичных аммонийных солей обуславливает улучшение ряда эксплуатационных характеристик наполненных им эпоксидных материалов. Так, растет твердость композиций, увеличивается их износостойкость, а при отверждении АФ-2 также снижается коэффициент статического трения. Можно предположить, что ЧАС действуют как катализаторы отверждения эпоксидных материалов. Уменьшение износа и возрастание твердости, по-видимому, связано с увеличением степени сшивки композиций, а длина цепи ЧАС, возможно, влияет на расстояние между узлами сетки. Большой эффект исследованного класса ПАВ при отверждении ГМДА обусловлен, на наш взгляд, большей активностью ЧАС при повышенных температурах.

При этом более перспективно использование алкилтриметиламоний хлорида с более длинным алкильным радикалом.

### Список литературы

1. Антифрикционные композиционные полимерные материалы для узлов трения / В.И. Колесников, Ю.Ф. Мигаль, Н.А. Мясников, В.И. Колесников // Вестник Юж. науч. центра. – 2004. – № 1. – С. 13–16.
2. Тюльнин В.А., Ткач В.Р., Эйрих В.И. Волластонит – уникальное минеральное сырье многоцелевого назначения. – М.: Руда и металлы, 2003. – 144 с.
3. 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. 14–19.
4. Полимерная фрикционная композиция (варианты): пат. 2090578 Рос. Федерация. – № 93034917/04; заявл. 05.07.1993; опубл. 20.09.1997, Бюл. № 23 (II ч.).
5. Бондалетова Л.И., Бондалетов В.Г. Полимерные композиционные материалы: учеб. пособие. – М.: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2013. – 114 с.
6. Сагитова Г.Ф., Даулетбаева И., Шегебаева А. Применение поверхностно-активных веществ (ПАВ) из отходов для активации минеральных наполнителей: учеб. пособие. – М.: Изд-во Юж.-Казахстан. гос. ун-та им. М. Ауезова, 2007. – 69 с.
7. Ланге К.Р. Поверхностно-активные вещества: синтез, свойства, анализ, применение. – М.: Профессия; СПб., 2007. – 240 с.
8. Ильичева Е.С. Резины на основе каучуков общего назначения, наполненных волластонитом: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Казань, 2014. – 23 с.
9. Бутенко В.И. Исследование качества поверхностного слоя обрабатываемой стали // Известия вузов. Машиностроение. – 1979. – № 4. – С. 101–104.
10. Шуракова О.Э. Разработка составов, изучение структуры и свойств антифрикционных композитов с добавками модифицированного лигнина: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новочеркасск, 2012. – 38 с.
11. Материаловедение в машиностроении и промышленных технологиях: учеб.-справ. руководство / В.А. Струк, Л.С. Пинчук, Н.К. Мышкин, В.А. Гольдаде, П.А. Витязь. – Долгопрудный: Интеллект, 2010. – 536 с.
12. Филиппова Г.А., Иванов В.А. Исследование технологических и термических свойств антифрикционных материалов на основе эпоксидных, фенольных смол, модифицированных ПТФЭ / Хабаровск. гос. техн. ун-т. – Хабаровск, 1993. – 13 с.
13. Евдокимов Ю.А. Результаты исследований антифрикционных композиций, изготовленных на базе эпоксидных смол // Механика полимеров. – 1972. – № 1. – С. 50–52.
14. Изучение влияния высокодисперсных и наноразмерных неорганических добавок на структурно-физические характеристики эпоксидных матриц и свойства трибопластиков / В.К. Крыжановский, И.В. Никитина, О.Г. Ясногородская, В.Е. Бахарева, А.С. Савелов, И.В. Блышко // Вопросы материаловедения. – 2009. – № 1(57). – С. 66–76.
15. Евдокимов Ю.А., Барсуков Р.Х. Результаты исследований антифрикционных свойств группы полимерных композиций, изготовленных на базе эпоксидных смол // Механика полимеров. – 1972. – № 1. – С. 87–90.

## References

1. Kolesnikov V.I., Migal' Iu.F., Miasnikov N.A., Kolesnikov V.I. Antifriktsionnye kompozitsionnye polimernye materialy dlia uzlov treniia [Antifrictional composite polymeric materials for frictional units]. *Vestnik Iuzhnogo nauchnogo tsentra*, 2004, no. 1, pp. 13–16.
2. Tiul'nin V.A., Tkach V.R., Eirikh V.I. Vollastonit – unikal'noe mineral'noe syr'e mnogotselevogo naznacheniiia [Vollastonit – unique mineral raw materials of universal purpose]. Moscow: Ruda i metally, 2003, 144 p.
3. Antipova E.A., Korotkova N.P., Lebedev V.S. Sovremennye poliuretanovye, epoksidnye, PU-akrilatnye i epoksiakrilatnye sviazuushchie dlia industrial'nykh LKM proizvodstva OOO «NPP «MAKROMER» [Modern polyurethane, epoxy, PU-akrilatnye and epoksiakrilatny productions of LLC NPP MAKROMER, binding for industrial LKM]. *Lakokrasochnye materialy i ikh primenie*, 2012, no. , pp. 14–19.
4. Polimernaia friktsionnaia kompozitsiia (varianty) [Polymeric frictional composition (options)]. Patent 2090578 Rossiiskaia Federatsiia no. 93034917/04 (1997).
5. Bondaletova L.I., Bondaletov V.G. Polimernye kompozitsi-onnye materialy [Polymeric composite materials]. Uchebnoe posobie. Moscow: Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2013, 114 p.
6. Sagitova G.F., Dauletbaeva I., Shegebaeva A. Primenenie poverkhnostno-aktivnykh veshchestv (PAV) iz otkhodov dlia aktivatsii mineral'nykh napolnitelei [Use of the surfactants from waste for activation of mineral fillers]. Uchebnoe posobie. Moscow: Izdatel'stvo Iuzhno-Kazakhstanskogo gosudarstvennogo universiteta imeni M. Auezova, 2007, 69 p.
7. Lange K.R. Poverkhnostno-aktivnye veshchestva: sintez, svoistva, analiz, primenie [Surfactants: synthesis, properties, analysis, application]. Moscow: Professiia; Saint-Petersburg, 2007, 240 p.
8. Il'icheva E.C. Reziny na osnove kauchukov obshchego naznacheniiia, napolnen-nykh vollastonitom [Rubbers on the basis of the rubbers of general purpose filled vollas-tonity]. Abstract of Ph.D. thesis. Kazan', 2014, 23 p.
9. Butenko V.I. Issledovanie kachestva poverkhnostnogo sloia obrabatyvaemoi stali [Research of quality of a blanket of the processed steel]. *Izvestiia vuzov. Mashino-stroenie*, 1979, no. 4, pp. 101–104.
10. Shkurakova O.E. Razrabotka sostavov, izuchenie struktury i svoistv anti-friktsionnykh kompozitov s dobavkami modifitsirovannogo lignin [Development of struc-tures, studying of structure and properties of antifrictional composites with additives of the modified lignin]. Abstract of Ph.D. thesis. Novocherkask, 2012, 38 p.
11. Struk V.A., Pinchuk L.S., Myshkin N.K., Gol'dade V.A., Vitiaz' P.A. Materia-lovedenie v mashinostroenii i promyshlennykh tekhnologiiakh [Materials science in me-chanical engineering and industrial technologies]. Uchebno-spravocnoe rukovodstvo. Dolgoprudnyi: Intellekt, 2010, 536 p.
12. Filippova G.A., Ivanov V.A. Issledovanie tekhnologicheskikh i termicheskikh svoistv antifriktsionnykh materialov na osnove epoksidnykh, fenol'nykh smol, modifitsiro-vannykh PTFE [Research of technological and thermal properties of antifrictional materials

on the basis of the epoxy, phenolic resins modified by PTFE]. Khabarovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet. Khabarovsk, 1993, 13 p.

13. Evdokimov Iu.A. Rezul'taty issledovaniia antifriktsionnykh kompozitsii, izgotovlennykh na baze epoksidnykh smol [Results of researches of the antifrictional compositions made on the basis of epoxy resins]. *Mekhanika polimerov*, 1972, no. 1, pp. 50–52.

14. Kryzhanovskii V.K., Nikitina I.V., Iasnogorodskaia O.G., Bakhareva V.E., Savelov A.S., Blyshko I.V. Izuchenie vliianiia vysokodispersnykh i nanorazmernykh neorganicheskikh dobavok na strukturno-fizicheskie kharakteristiki epoksidnykh matrity i svoistva triboplastikov [Studying of influence of high-disperse and nanodimensional inorganic additives on structural and physical characteristics of epoxy matrixes and property of triboplastik]. *Voprosy materialovedeniia*, 2009, no. 1(57), pp. 66–76.

15. Evdokimov Iu.A., Barsukov R.Kh. Rezul'taty issledovaniia antifriktsionnykh svoistv gruppy polimernykh kompozitsii, izgotovlennykh na baze epoksidnykh smol [Results of researches of antifrictional properties of group of the polymeric compositions made on the basis of epoxy resins]. *Mekhanika polimerov*, 1972, no. 1, pp. 87–90.

Получено 16.05.2017

#### **Об авторах**

**Готлиб Елена Михайловна** (Казань, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры технологий синтетического каучука Казанского национального исследовательского технологического университета; e-mail: egotlib@yandex.ru.

**Галимов Энгель Рафикович** (Казань, Россия) – доктор технических наук, профессор, академик Российской экологической академии, заведующий кафедрой материаловедения, сварки и производственной безопасности Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ; e-mail: kstu-material@mail.ru.

**Хасанова Альмира Рамазановна** (Казань, Россия) – аспирантка кафедры материаловедения, сварки и производственной безопасности Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ; e-mail: miracle543543@mail.ru.

**Ямалеева Екатерина Сергеевна** (Казань, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры технологического оборудования медицинской и легкой промышленности Казанского национального исследовательского технологического университета; e-mail: curls888@yandex.ru.

#### **About the authors**

**Elena M. Gotlib** (Kazan, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Synthetic Rubber Technologies, Kazan National Research Technological University; e-mail: egotlib@yandex.ru.

**Engel R. Galimov** (Kazan, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of Russian Ecological Academy, Head of Department of Materials

Science, Welding and Production Safety, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI; e-mail: kstu-material@mail.ru.

**Almira R. Khasanova** (Kazan, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Materials Science, Welding and Production Safety, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI; e-mail: miracle543543@mail.ru.

**Ekaterina S. Yamaleeva** (Kazan, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technological Equipment of Medical and Light Industry, Kazan National Research Technological University; e-mail: curls888@yandex.ru.