

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК / TECHNICAL SERVICE IN AGRICULTURE

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL ARTICLE

УДК 621.822.6.004.67:678.344.329

DOI 10.26897/1728-7936-2018-6-45-50

**ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АНАЭРОБНОГО ГЕРМЕТИКА АН-111****КОНОНЕНКО АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ**, докт. техн. наук, профессор<sup>1</sup>

E-mail: as-kononenko@yandex.ru

**ПСАРЕВ ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ**, канд. техн. наук, доцент<sup>2</sup>

E-mail: psarev\_380@mail.ru

**РОЖНОВ АНДРЕЙ БОРИСОВИЧ**, старший преподаватель<sup>2</sup>

E-mail: smart-68@yandex.ru

<sup>1</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана; 105005, ул. 2-я Бауманская, 5, Москва, Российская Федерация<sup>2</sup> Мичуринский государственный аграрный университет; 393760, ул. Интернациональная, 101а, Мичуринск, Российская Федерация

Рассмотрены механизмы влияния дисперсных частиц на прочностные свойства полимерных композиционных материалов. Установлены закономерности ударной вязкости композиций от прочности волокон наполнителя и модуля упругости. Представлена методика исследований стойкости полимерного композиционного материала к циклическим нагрузкам. Проведены исследования влияния углеродных нанотрубок на ударную вязкость полимерных композиционных материалов и их долговечность при циклическом нагружении. Приведена методика исследования долговечности неподвижных соединений подшипников качения. Анализ результатов ускоренных испытаний показал, что после 330 ч непрерывной работы испытательного стенда при максимально возможной радиальной нагрузке, равной 20 кН, долговечность соединений с нанокмпозицией из анаэробного герметика АН-111 до 60% выше, чем у соединений с ненаполненным полимерным составом АН-111 (разрушение клеевого шва толщиной 0,2 мм произошло через 24 часа у ненаполненного герметика и через 39 часов у полимерной композиции). Применение полученной нанокмпозиции позволит восстанавливать неподвижные соединения подшипников качения с износом до 0,125 мм.

**Ключевые слова:** полимерная композиция, углеродные нанотрубки, деформационно-прочностные свойства, анаэробный герметик, долговечность, циклические нагрузки, ударная вязкость.

**Формат цитирования:** Кононенко А.С., Псарев Д.Н., Рожнов А.Б. Долговечность полимерных композиционных материалов на основе анаэробного герметика АН-111 // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2018. N 6(88). С. 45-50. DOI 10.26897/1728-7936-2018-6-45-50.

**DURABILITY OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS ON THE BASIS OF ANAEROBIC SEALANT AN-111****ALEKSANDR S. KONONENKO**, DSc (Eng), Professor<sup>1</sup>

E-mail: as-kononenko@yandex.ru

**DMITRIY N. PSAREV**, PhD (Eng), Associate Professor<sup>2</sup>

E-mail: psarev\_380@mail.ru

**ANDREY B. ROZHNOV**, Senior Lecturer<sup>2</sup>

E-mail: smart-68@yandex.ru

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University; 105005, 2-nd Baumanskaya Str., 5, Moscow, Russian Federation<sup>2</sup> Michurinsk State Agrarian University; 393760, Internatsional'naya Str., 101a, Michurinsk, Russian Federation

The paper considers a mechanisms of influence of disperse particles on the strength properties of polymeric composite materials. The authors have determined consistent patterns of impact strength of compositions depending

on the durability of a filler and the module of elasticity. The paper presents a technique to study the resistance of polymeric composite material to cyclic loadings. The authors have conducted researches of the influence of carbon nanotubes on the impact strength of polymeric composite materials and their durability at cyclic loads. The also propose a technique and research results of the durability of fixed connections of roller bearings. The analysis of durability tests carried out for 330 hours of continuous bench operation has shown that at the greatest possible radial loading of equal 20 kN the durability of nanocomposition connections of anaerobic sealant AN-111 is up to 60% higher as compared with unfilled sealant AN-111 (the destruction of a glue line with a thickness of 0.2 mm was observed in 24 hours for an unfilled sealant and in 39 hours for a polymer composition). The application of this nanocomposition allows to restore fixed connections of roller bearings with a wear degree of up to 0.125 mm.

**Key words:** polymeric composition, carbon nanotubes, deformation-strength properties, anaerobic sealant, durability, cyclic loadings, impact strength.

**For citation:** Kononenko A.S., Psarev D.N., Rozhnov A.B. Durability of polymeric composite materials on the basis of anaerobic sealant AN-111. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2018; 6(88):45-50. (in Rus.). DOI 10.26897/1728-7936-2018-6-45-50.

**Введение.** Полимерные композиционные материалы (ПКМ) находят широкое применение при изготовлении и ремонте автотракторной техники. Они обеспечили качественно новый уровень решения проблемы склеивания, фиксации, герметизации и уплотнения соединений деталей типа «вал» с сопрягаемыми деталями. Одной из основных областей применения полимерных материалов при производстве машин и оборудования является фиксация соединений подшипников качения [1].

Для повышения потребительских свойств в состав полимера вводят наполнители. Благодаря этому увеличиваются статическая прочность, теплопроводность, устойчивость к циклическому нагружению. Представляет научный и практический интерес исследование влияния наноразмерных наполнителей на деформационно-прочностные свойства полимерных композиционных материалов.

**Цель исследования** – рассмотреть факторы, влияющие на долговечность соединений с полимерными композиционными материалами; определить оптимальную концентрацию наполнителя в композиции герметика АН-111; провести анализ зависимости долговечности неподвижных соединений подшипников 209 от толщины клеевого шва.

**Теоретические предпосылки.** Разрушение композиционного материала, наполненного дисперсными частицами, условно можно разделить на следующие стадии [2]:

- 1) инициирование микротрещин и микропор;
- 2) развитие магистральной трещины (хрупкие матрицы) или рост и слияние микропор (пластичные матрицы).

Введение дисперсных наполнителей в хрупкую полимерную матрицу повышает ее трещиностойкость. При этом поверхностная энергия разрушения ПКМ возрастает в несколько раз по сравнению с ненаполненными полимерами [3-5].

Надежность неподвижных соединений подшипников качения, восстановленных ПКМ, зависит от стойкости материала к ударным нагрузкам. Одним из важнейших параметров, характеризующих надежность соединений при эксплуатации в нагруженных узлах, является ударная вязкость конструкционного материала.

В работе [6] для оценки ударной вязкости композита автор предлагает использовать следующую зависимость:

$$a_x = a_M (1 - V_a) + \frac{(\sigma'_a)^2}{2E_a} V_a, \quad (1)$$

где  $a_x$  – ударная вязкость композита, кДж/м<sup>2</sup>;  $a_M$  – ударная вязкость полимерной матрицы, кДж/м<sup>2</sup>;  $V_a$  – объемное содержание волокнистого наполнителя, %;  $\sigma'_a$  – прочность волокон, ГПа;  $E_a$  – модуль упругости волокон, ГПа.

Согласно уравнению (1), ударная вязкость ПКМ прямо пропорциональна квадрату прочности волокон и обратно пропорциональна их модулю упругости. На рисунке 1 представлен график зависимости ударной вязкости эпоксидных композитов от параметров  $\frac{(\sigma'_a)^2}{2E_a}$  [6], на котором отчетливо видно линейное увеличение ударной вязкости с увеличением соотношения  $\frac{(\sigma'_a)^2}{2E_a}$ .

Из формулы (1) следует, что для получения ПКМ с наибольшими значениями ударной вязкости необходимо использовать наполнители с высокой прочностью и относительно низкими значениями модуля упругости. В связи с этим углеродные нанотрубки (УНТ), обладающие уникальными физико-механическими характеристиками, являются наиболее предпочтительным видом наполнителя (таблица).

Также при использовании в качестве наполнителя частиц с микрометрическим размером (бороволокниты, карбоволокниты, стекловолокониты) ударная вязкость принимает максимальные значения при концентрации наполнителя 45...65% [6], в то время как УНТ показывает максимумы при концентрации 4...5% (рис. 2) [7].

Существенное увеличение вязкости разрушения в результате введения УНТ в полимерную матрицу связывают со сложной запутанной структурой (в виде сетки), формируемой нанонаполнителем, а также с возможностью растягивания и выпрямления изогнутых нанотрубок. Последний механизм основывается на двух характерных особенностях нанотрубок. Во-первых, УНТ закрепляются на макромолекулах матрицы – на границах трещин, которые служат своего рода «яко-

рями» для нанотрубок. Второй особенностью является то, что УНТ, будучи гибкими, сворачиваются, образуя спутанные клубки. В результате чего при приближении трещины к нанотрубке последняя не должна, как твер-

дое волокно, растягиваться или отслаиваться от матрицы, а – просто распрямляться позади вершины трещины. При дальнейшем росте трещины распрямившиеся нанотрубки растягиваются [8].

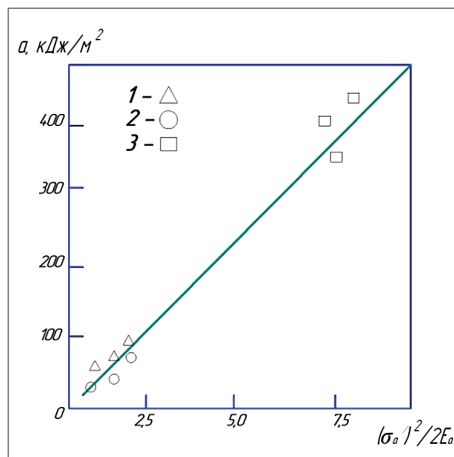


Рис. 1. Зависимость ударной вязкости эпоксидных композитов от параметров  $(\sigma'_a)^2/2E_a$ :  
1 – борволокниты; 2 – карбоволокниты; 3 – стекловолокниты

Fig. 1. Relationship between the impact resistance of epoxy composites and parameters  $(\sigma'_a)^2/2E_a$ :  
1 – boron plastics; 2 – carbon fiber plastics; 3 – fiber-glass plastics

**Механические свойства материалов [7]**  
**Mechanical properties of materials [7]**

Характеристика	Графит	Углеродные волокна	Многослойные УНТ	Однослойные УНТ	Сталь
Прочность на растяжение, ГПа	100	3...7	300...600	300...1500	0,4
Модуль упругости, ГПа	1000	200...800	500...1000	1000...5000	2000
Предельное растяжение, %	10	1...3	20...40	20...40	26

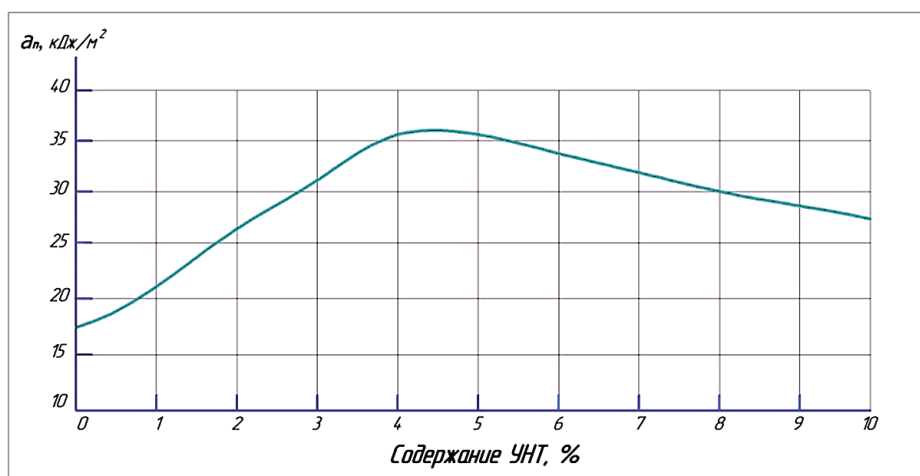


Рис. 2. Влияние содержания УНТ «Таунит» на ударную вязкость

Fig. 2. Effect of the carbon nanotube “Taunit” content on its impact resistance

**Методика.** Для подтверждения представленных теоретических предпосылок провели исследования долговечности подшипниковых узлов, восстановленных полимерной композицией на основе анаэробного герметика АН-111 с УНТ (4,5 масс. ч) [9-12] и неполненным адгезивом АН-111, при воздействии на них вибрационных нагрузок.

Вибратор представляет собой асинхронный короткозамкнутый электродвигатель. На концах вала ротора установлены дебалансы, которые являются источником возмущающих колебаний. Вибратор закреплен на двух металлических плитах размерами 500×500×25 мм и массой 50 кг каждая. Плиты установлены на металлическое основание размером 500×500×10 посредством четырех винтовых пружин. Высота пружин составляет 121 мм. Частота вращения ротора достигала 3000 мин<sup>-1</sup>. Количество циклов нагружения фиксировали при помощи счетчика, соединенного с валом стенда. Посадочные отверстия в подшипниковых щитах вибратора растачивали и в них запрессовывали специально изготовленные втулки из чугуна СЧ-20 (ГОСТ 1412-85). Смазку подшипников проводили ВНИИМП-242 (ГОСТ 20241-74).

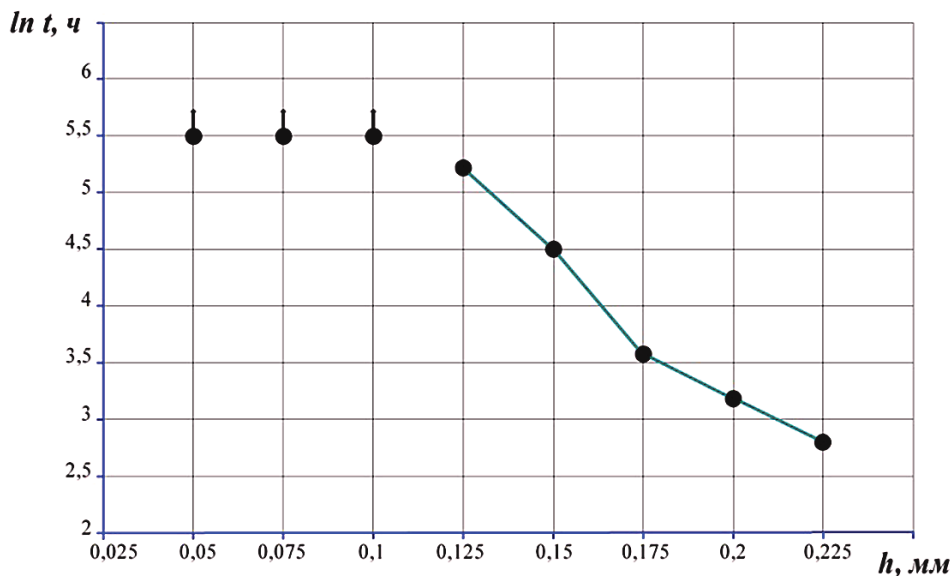
Зазор в клеевом соединении до склеивания обеспечивали растачиванием посадочной поверхности чугунной втулки. Адгезив наносили на наружное кольцо под-

шипника и посадочную поверхность чугунной втулки. В качестве адгезива использовали анаэробный герметик АН-111 и нанокompозицию на его основе.

Испытания на долговечность, при отсутствии сдвига наружного кольца подшипника в щите, проводили в течение  $N = 5,94 \cdot 10^7$  циклов нагружения, что соответствует 330 ч работы стенда.

**Результаты и обсуждение.** Долговечность неподвижного соединения уменьшается с увеличением толщины клеевого шва. Зависимость, построенная в полупрологарифмических координатах, имеет нелинейный характер. Подобные зависимости называют кривыми Веллера.

При толщине клеевого шва  $h = 0,225$  мм долговечность наименьшая, проворот наружного кольца наблюдается через 16 ч работы стенда. При  $h = 0,2$  мм долговечность соединения возрастает в 1,5 раза (24 ч). При толщине клеевого шва  $h = 0,15$  мм долговечность возрастает по сравнению с  $h = 0,2$  мм в 3,83 раза, а в сравнении с  $h = 0,225$  мм – в 5,75 раза и составляет 92 ч. Значительный рост долговечности наблюдается при толщине клеевого шва  $h = 0,125$  мм (184 ч). По сравнению с  $h = 0,15$  мм долговечность возрастает в 2 раза, а с  $h = 0,2$  мм – в 7,67 раза (рис. 3). Это можно объяснить масштабным фактором.



**Рис. 3.** Зависимость долговечности  $t$  неподвижных соединений подшипников 209 от толщины клеевого шва герметика АН-111 при радиальной нагрузке  $P = 20$  кН

**Fig. 3.** Relationship between durability  $t$  of fixed joints of bearings 209 and the thickness of the adhesive joint of the AN-111 sealant at a radial load  $P = 20$  kN

Чем больше толщина клеевого шва, тем больше объем полимерного материала и больше вероятность возникновения дефектов (поры, микротрещины и т.д.), которые снижают долговечность клеевого шва. При толщине клеевого шва  $h = 0,1$  мм сдвига наружного кольца подшипника в течение 330 ч работы стенда не зафиксировано.

Поэтому максимальной допустимой толщиной клеевого шва герметика АН-111 при циклической радиальной нагрузке  $P = 20$  кН является 0,1 мм.

При толщине клеевого шва  $h = 0,225$  мм долговечность наименьшая, проворот наружного кольца наблюдается через 27 ч работы стенда. При  $h = 0,2$  мм этот показатель возрастает в 1,44 раза (39 ч). По сравнению с не-

наполненным герметиком АН-111 долговечность повысилась в 1,63 раза. При толщине клеевого шва  $h = 0,15$  мм она возрастает многократно по сравнению с  $h = 0,2$  мм – в 3,9 раза, а с  $h = 0,225$  мм – в 5,63 раза и составляет 152 ч. По сравнению с ненаполненным герметиком АН-111 долговечность повысилась в 1,65 раза (рис. 4).

При толщине клеевого шва  $h = 0,125$  мм сдвига наружного кольца подшипника в течение 330 ч работы стэнда не зафиксировано. Поэтому максимальной допустимой толщиной клеевого шва композиции анаэробного герметика АН-111 при циклической радиальной нагрузке  $P = 20$  кН является 0,125 мм.

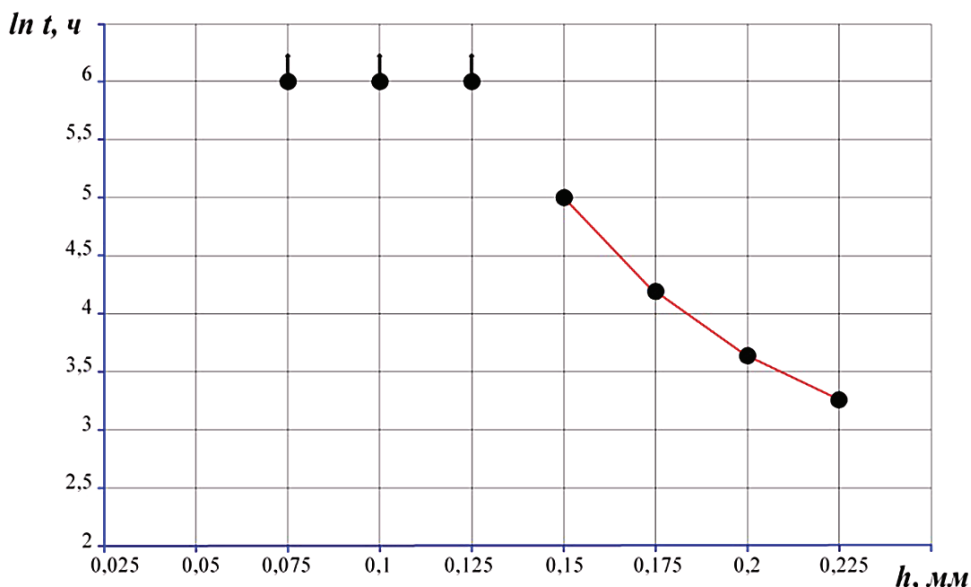


Рис. 4. Зависимость долговечности  $t$  неподвижных соединений подшипников 209 от толщины  $h$  клеевого шва композиции герметика АН-111 при радиальной нагрузке  $P = 20$  кН

Fig. 4. Relationship between durability  $t$  of fixed joints of bearings 209 and thickness  $h$  of glue line of the AN-111 sealant composition at a radial load  $P = 20$  kN

#### Выводы

1. Повышение долговечности клеевых соединений композиции АН-111, по сравнению с ненаполненным герметиком АН-111, объясняется улучшением структуры материала, а также увеличением удельной работы разрушения или вязкостью разрушения материала.

2. Экспериментальными исследованиями установлено, что долговечность соединений с композицией АН-111 до 60% выше по сравнению с ненаполненным герметиком АН-111, что позволяет восстанавливать неподвижные соединения подшипников с износами до 0,125 мм.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-48-680702-р\_а

This work was supported by the RFBR (Russian Foundation for Basic Research) grant No. 17-48-680702-p\_a.

#### Библиографический список

- Li R.I., Shipulin M.A. Evaluative quality parameters in nondestructive control of adhesive metallic bonds in machine unit. Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials, 2012, Volume 5, Number 1, Pp. 15-19. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995421212010108>.
- Бартенев Г.М. Прочность и механизм разрушения полимеров. М., 1984. 280 с.
- Кононенко А.С., Дмитраков К.Г. Стойкость полимерных составов холодного отверждения и наномодификаций на их основе к вибрационным нагрузкам // Ремонт, восстановление, модернизация. 2016. № 3. С. 22-25.

- Кононенко А.С., Дмитраков К.Г. Адгезионная прочность составов холодного отверждения и нанокomпозиций на их основе // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2016. № 11. С. 10-14.
- Кононенко А.С., Алешин В.Ф., Колобов А.Ю., Дмитраков К.С. Улучшение механических и эксплуатационных свойств полимерных материалов использованием наполнителей // Междунар. науч. журнал. 2016. № 3. С. 59-66.
- Гуняев Г.М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов. М.: Химия, 1981. 232 с.
- Ткачев А.Г. Промышленное производство углеродного наноструктурного материала «Таунит» / А.Г. Ткачев,

С.В. Мищенко, В.Л. Негров, С.В. Блинов, Д.А. Турлаков, Н.Р. Меметов // *Наноиндустрия*. 2007. № 2. С. 24-26.

8. Овидько И.А. Механика процессов роста трещин в нанокерамиках / И.А. Овидько, А.Г. Шейнерман, Е.С. Aifantis // *Materials Physics and Mechanics*, 2011; 12: 1-29.

9. Композиция для склеивания металлических изделий: Патент на изобретение № 2526991 РФ / Р.И. Ли, А.В. Бутин, А.Б. Рожнов, В.Н. Сафонов; заявл. 05.02.2013; опубл. 27.08.2014. Бюл. № 24.

10. Рожнов А.Б., Ли Р.И., Хатунцев В.В. Исследование деформационно-прочностных свойств полимерной нанокомпозиции на основе анаэробного герметика АН-111 // *Вестник МичГАУ*. 2014. № 6. С. 43-46.

11. Рожнов А.Б. Технология механизированного нанесения полимерных покрытий на подшипники качения / А.Б. Рожнов, Д.Н. Псарев, Р.И. Ли, В.В. Хатунцев, М.М. Мишин, С.Ю. Астапов // *Достижения науки и техники в АПК*. 2016. Т. 30. № 5. С. 86-88.

12. Рожнов А.Б., Ли Р.И. Перспективный полимерный композиционный наноматериал для фиксации деталей подшипникового узла в трансмиссии автотракторной техники // *Сб. науч. тр. по материалам ежегодных конференций: Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования*, 2016. Т. 3. Вып. 1(4). С. 519.

## References

1. Li R.I., Shipulin M.A. Evaluative quality parameters in nondestructive control of adhesive metallic bonds in machine unit. *Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials*, 2012; 5(1): 15-19. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995421212010108>. (in Rus.).

2. Bartenev G.M. Prochnost' i mekhanizm razrusheniya polimerov [Durability and a mechanism of the destruction of polymers]. Moscow, 1984: 280.

3. Kononenko A.S., Dmitrakov K.G. Stoikost' polimernykh sostavov kholodnogo otvergdeniya i nanpmodifikatsiy na ikh osnove k vibratsionnym nagruzkam [Resistance of polymeric structures of cold hardening and nanomodifications on their basis to vibration loadings]. *Remont, vosstanovleniye, modernizatsiya*, 2016; 3: 22-25. (in Rus.).

4. Kononenko A.S., Dmitrakov K.G. Adgezionnaya prochnost' sostavov kholodnogo otvergdeniya i nanpmodi-

fikatsiy na ikh osnove [Adhesive durability of cold hardening structures and nanocompositions on their basis]. *Remont, vosstanovleniye, modernizatsiya*, 2016; 11: 10-14. (in Rus.).

5. Kononenko A.S., Aleshin V.F., Kolobov A.Yu., Dmitrakov K.G. Uluchshenie mahanicheskikh i ekspluatatsionnykh svoystv polimernykh materialov ispol'zovaniem napolnitelei [Improving mechanical and operational properties of polymeric materials by means of fillers]. *Mezhdunar. nauch. zhurnal*, 2016; 3: 59-66. (in Rus.).

6. Gunyaev G.M. Structura i svoystva polimernykh voloknistykh kompozitov [Structure and properties of polymeric fibrous composites]. Moscow, Khimiya, 1981: 232. (in Rus.).

7. Tkachev A.G., Mischenko S.V., Negrov V.L., Blinov S.V. Uglerodnye nanomaterialy "Taunit": issledovanie, proizvodstvo, primeneniye [Carbon nanomaterials "Taunit": research, production, application]. *Nanotekhnika*, 2006; 2: 24-26. (in Rus.).

8. Ovid'ko I.A., Sheynerman A.G., Aifantis E.C. Mekhanika processa rosta treschin v nanokeramokah [Mechanics of crack growth processes in nanoceramic products]. *Materials Physics and Mechanics*, 2011; 12: 1-29.

9. Li R.I., Butin A.V., Rozhnov A.B., Safonov V.N. Kompozitsiya dlya skleivaniya metallicheskikh izdeliy [Composition for pasting of metal products]: Patent na izobreteniye No. 2526991 RF, 2014. (in Rus.).

10. Rozhnov A.B., Li R.I., Khatuntsev V.V. Issledovanie deformatsionno-prochnostnykh svoystv polimernoy nanokompozitsii na osnove anaerobnogo germetika АН-111 [Study of deformation-strength properties of polymeric nanocomposition on the basis of anaerobic sealant АН-111]. *Vestnik MichGAU*, 2014; 6: 43-46. (in Rus.).

11. Rozhnov A.B., Psarev D.N., R.I. Li, Khatuntsev V.V., Mishin M.M., Astapov S.Yu. Tekhnologiya mekhanizirovannogo naneseniya polimernykh pokrytiy na podshipniki kacheniya [Technology of mechanized polymeric coating of roller bearings]. *Dostizheniya nauki i tekhniki v APK*, 2016; 30(5): 86-88 (in Rus.).

12. Rozhnov A.B., Li R.I. Perspektivniy polimerniy kompozitsionniy nanomaterial dlya fiksatsii detaley podshipnikovogo uzla v transmssii avtotraktornoi tekhniki [Prospects of using polymeric composite nanomaterials for fixing parts of bearing in automobile and tractor transmission], 2016; 3(1(4)): 519. (in Rus.).

## Критерии авторства

Кононенко А.С., Псарев Д.Н., Рожнов А.Б. выполнили экспериментальную работу, на основании полученных результатов провели обобщение и написали рукопись. Кононенко А.С., Псарев Д.Н., Рожнов А.Б. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила 25.09.2018

## Contribution

Kononenko A.S., Psarev D.N., Rozhnov A.B. carried out the experimental work, and basing on the obtained results summarized the material and wrote the manuscript. Kononenko A.S., Psarev D.N., Rozhnov A.B. have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

## Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The paper was received on September 25, 2018