5. Methyl ester of sunflower oil as an ecological component of petroleum motor fuels / V.A. Markov, S.N. Devyanin, E.A. Ulyukin, N.N. Pulyaev // Transport on alternative fuel. - 2015. - No. 4 (46). - S. 29-41.

6. Use of mixtures of diesel fuel and sunflower oil methyl ether as a motor fuel / V.A. Markov, S.N. Devyanin, E.A. Ulyukin, N.N. Pulyaev // Truck. - 2016. - No. 1. - P. 37-48.

7. Sister, V.G. Technologies for obtaining biodiesel fuel / V.G. Sister, E.M. Ivannikova, A.I. Yamchuk // Proceedings of MSTU MAMI. - 2013. - T. 2. - No. 3 (17). - S. 109-112.

8. Meshcheryakov, A.G., Nagornov, S.A., and Meshcheryakova, Yu.V., Study of the fuel equipment of a mixed-fuel tractor with a built-in modular mixer, Science in Central Russia. - 2021. - No. 5(53). - S. 90-95.

9. Kalekin A.A. Fundamentals of hydraulics and technical hydromechanics / A.A. Kalekin. – M.: Mir, 2008. – 280 p.

10. Egorov I.N. Improving the performance properties of diesel fuels in agricultural production: dis. … cand. Those. Sciences: 05.20.03: approved.1983. - Velikiye Luki, 1983. - 290 p.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Мещеряков Александр Геннадьевич – соискатель, Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно- исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: alex_mec@bk.ru

Нагорнов Станислав Александрович - доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: snagornov@yandex.ru

Мещерякова Юлия Владимировна - кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно- исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: yulya-belova@yandex.ru

Author credentials

Affiliations

Meshcheryakov Alexander - applicant, Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute for the Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture", Russia, Tambov, e-mail: alex_mec@bk.ru.

Meshcheryakova Yulia - Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute for the Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture", Russia, Tambov, e-mail: yulya-belova@yandex.ru.

Stanislav Nagornov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute for the Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture", Russia, Tambov, e-mail: snagornov@yandex.ru.

Поступила в редакцию (Received): 02.02.2022 Принята к публикации (Accepted): 12.02.2022

УДК 621.822.6.004.67: 668.3: 631.3.02
DOI: 10.35887/2305-2538-2022-1-81-91

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ

[1]Ли Роман Иннакентьевич
[2]Псарев Дмитрий Николаевич
[3]Киба Мария Романовна
[1]Мельников Антон Юрьевич
[1]Быконя Андрей Николаевич

[1]ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк
[2]ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», г. Мичуринск
[3]ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный горный университет»

Реферат. *Введение дисперсных металлических частиц в полимерную матрицу многократно увеличивает коэффициент теплопроводности материала. Значения теплопроводности полимерных микрокомпозитов, определенные по формулам Оделевского и Миснара, отличаются от экспериментальных в меньшую сторону более чем на 60%. Необходима оценка пригодности известных аналитических формул для расчета коэффициента теплопроводности полимерных нанокомпозитов. Расчет теплопроводности полимерного двухкомпонентного нанокомпозита по формулам Максвелла, Оделевского и Дульнева показал, что расчетные значения теплопроводности отличаются от экспериментальных от 85,2 до 88,2 раза. Исследована теплопроводность нанокомпозитов на основе эластомера Ф-40С с наполнителями: алюминиевый нанопорошок, углеродные нанотрубки «Таунит». Экспериментально определены коэффициенты теплопроводности эластомерных нанокомпозитов с оптимальными составами, при которых достигаются наиболее высокие деформационно-прочностные и адгезионные свойства материалов. Состав №1: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч., алюминиевый нанопорошок – 0,075 масс.ч. Состав №2: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч., углеродные нанотрубки «Таунит» – 0,1 масс.ч. По формуле Бургера определен поправочный коэффициент С и рассчитаны значения коэффициента теплопроводности нанокомпозитов с массовым содержанием алюминиевого нанопорошка* m_n *= 0,025; 0,05 и 0,1 масс.ч. Экспериментальные и расчетные значения коэффициента теплопроводности* $\lambda_к$ *эластомерного нанокомпозита при различном содержании алюминиевого нанопорошка отличаются от 11 д 19%. Аналогичным образом получена формула Бургера для нанокомпозита, наполненного углеродными нанотрубками «Таунит». Экспериментальные и расчетные значения коэффициента теплопроводности* $\lambda_к$ *эластомерного нанокомпозита при массовом содержании углеродных нанотрубок* m_n *= 0,05 и 0,15 масс.ч. отличаются от 19 д 20%. Формула Бургера, в сочетании с экспериментальными исследованиями, позволяет получить адекватную модель теплопроводности двухкомпонентных полимерных нанокомпозитов.*

Ключевые слова: *восстановление, подшипник, посадка, нанокомпозит, теплопроводность, расчет.*

THERMAL CONDUCTIVITY STUDY OF POLYMER NANOCOMPOSITES

[1]Li Roman
[2]Psarev Dmitry
[3]Kiba Maria
[1]Melnikov Anton
[1]Bykonya Andrew

[1]FGBOU VO "Lipetsk State Technical University"
[2]FGBOU VO "Michurinsky State Agrarian University"
[3]FGBOU VO "St. Petersburg State Mining University"

Abstract. *Introduction of dispersed metal particles into polymer matrix repeatedly increases coefficient of thermal conductivity of material. The thermal conductivity values of polymer microcomposites, determined by the Odelevsky and Misnar formulas, differ from the experimental values by more than 60%. It is necessary to evaluate the suitability of known analytical formulas for calculating the thermal conductivity coefficient of polymer nanocomposites. Calculation of the thermal conductivity of a polymer two-component nanocomposite according to the formulas of Maxwell, Odelevsky and Dulnev showed that the calculated values of thermal conductivity differ from experimental values from 85.2 to 88.2 times. Heat conductivity of nanocomposites on the basis of F-40S elastomer with fillers is investigated: aluminum nanopowder, carbon nanotubes of "Taunit". Thermal conductivity coefficients of elastomeric nanocomposites with optimal compositions at which the highest deformation-strength and adhesion properties of materials are achieved are experimentally determined. Composition No. 1: elastomer F-40S - 100 parts by weight, aluminum nanopowder - 0.075 parts by weight. Composition No. 2: elastomer F-40S - 100 parts by weight, carbon nanotubes "Taunit" - 0.1 parts by weight. According to the Burger formula, the correction coefficient C is determined and the values of the thermal conductivity coefficient of nanocomposites with a mass content of aluminum nanopowder mn = 0.025 are calculated; 0.05 and 0.1 pts.wt*

Experimental and calculated values of thermal conductivity coefficient of elastomeric nanocomposite with different content of aluminium nanopowder differ from 11 d 19%. Similarly, the Burger formula for a nanocomposite filled with Taunit carbon nanotubes was obtained. Experimental and calculated values of thermal conductivity coefficient of elastomeric nanocomposite with mass content of carbon nanotubes mn = 0.05 and 0.15 mass parts. differ from 11 d 19%. The Burger formula, in combination with experimental studies, allows us to obtain an adequate model of the thermal conductivity of two-component polymer nanocomposites.

Keywords: *recovery, bearing, fit, nanocomposite, thermal conductivity, calculation.*

Введение. Подшипник качения является наиболее многочисленной типовой деталью в конструкции автомобилей и тракторов. Износ посадочных мест подшипников снижает ресурс подшипников, валов, шестерен, корпусных деталей. Поэтому увеличение долговечности изношенных посадочных мест подшипников при восстановлении создает условия для повышения надежности подшипниковых узлов и машины в целом. Применение полимерных материалов при восстановлении исключает появление фреттинг-коррозии – основной причины изнашивания посадочных мест, увеличивает многократно ресурс последних, а также подшипников качения и сопрягаемых деталей соединения (валов, осей и корпусных деталей) [1- 8].

Одним из важных факторов, влияющих на ресурс подшипникового узла, является его тепловой баланс. Теплопроводность полимерных материалов отличается от аналогичного параметра металлов меньшую сторону на несколько порядков, поэтому наличие полимерного слоя в сопряжении деталей подшипникового узла несколько затрудняет теплоотвод от вращающихся деталей подшипника. В конечном итоге температура подшипников на полимерной посадке на 3 – 5^0С превышает температуру подшипников со стандартной посадкой [9-10]. Это превышение температуры не влияет отрицательно на ресурс подшипника, однако в тяжело нагруженных подшипниковых узлах, работающих при повышенных температурах окружающей среды, возможно значительное увеличение температуры, перегрев и снижение долговечности подшипника. В этой связи, в настоящее время, для восстановления посадочных мест подшипников используют полимерные композиты. Введение дисперсных металлических частиц в полимерную матрицу многократно увеличивает коэффициент теплопроводности материала. Например, наполнение анаэробного герметика АН-112 металлическими микроразмерными частицами увеличивает коэффициент теплопроводности материала в 23 раза (от 0,44 до 10,06 Вт/м*К), эластомера Ф-40С – 73,96 раза (от 0,27 до 19,97 Вт/м*К).

В сравнении с не наполненным герметиком, температура подшипников на посадке из композита на основе АН-112 значительно уменьшилась на 12^oС [11-12].

В настоящее время все большее применение при восстановлении посадочных мест подшипников получают полимерные нанокомпозиты. Наночастицы отличаются от микроразмерных частиц наполнителя высокой удельной поверхностью и поэтому в единице объема полимерной матрицы их количество будет значительно больше. В итоге наполнение и высокие механические свойства полимерные нанокомпозиты имеют место при очень низкой концентрации наночастиц (до 5%) [13…17].

В работе [18] исследована теплопроводность трехкомпонентных микрокомпозитов на основе двух различных полимерных матриц: диметилсилоксанового каучука СКТН-А и полиуретана Сурэл-7, наполненных кварцем молотым пылевидным, алюминия нитридом и электрокорундом. Расчет теплопроводности композитов по формулам Оделевского и Миснара, сравнение расчетных значений с экспериментальными показали, что расчетные значения отличаются от экспериментальных в меньшую сторону. Чем больше отношение теплопроводности наполнителя $\lambda_н$ к теплопроводности полимерной матрицы $\lambda_п$, тем больше разница: при $\lambda_н / \lambda_п \geq 100$ разница между расчетным и экспериментальным значениями теплопроводности составляет более 40%, при $\lambda_н / \lambda_п \geq 250$ – более чем на 60%.

Анализ литературных источников показал, что отсутствуют подобные исследования в отношении полимерных нанокомпозитов. Представляют научный и практический интерес исследования теплопроводности вышеуказанных материалов. Цель исследований – провести теоретические и экспериментальные исследования и обосновать методику исследования и расчета теплопровод-

ности полимерных нанокомпозитов (Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № **20-38-90070\20**).

Материалы и методы. В экспериментальных исследованиях использовали образцы из нанокомпозитов на основе эластомера Ф-40С. Нанокомпозит, наполненный алюминиевым нанопорошком, имел четыре состава с различным содержанием наполнителя: эластомер Ф-40С (ТУ 6-06-246-92) – 100 масс.ч., алюминиевый нанопорошок (ТУ 1791-003-36280340-2008) – 0,025; 0,05; 0,075 и 0,1 масс.ч.; Нанокомпозит, наполненный углеродными нанотрубками имел три состава: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч., углеродные нанотрубки «Таунит» – 0,05; 0,1 и 0,15 масс.ч. Образцы изготовлены в виде дисков с размерами: диаметр 15 мм; толщина 0,5 мм.

Установка состоит из холодильника 1 (рис. 1), в котором циркулирует охлаждающая жидкость (водопроводная вода), блока дисков из различных материалов и нагревателя [11]. Блок дисков включает три медных диска 2, между которыми размещены образец-диск из исследуемого полимерного материала 8, диск из оргстекла 6. Размеры дисков: диаметр 15 мм; толщина 0,5 мм. Для тепловой изоляции от окружающей среды дисков 2, 6 и 8, последние поместили с натягом в трубу 7 из ПВХ. Последнюю также установили с натягом в резиновую втулку 4. К дискам 2 припаяны металлические стержни 3.

Первоначально включили нагреватель, затем открыли подачу охлаждающей жидкости в холодильник 1. После достижения установившегося температурного режима измеряли инфракрасным пирометром марки Testo 830-T4 температуру свободных концов стержней 3: T_1, T_2 и T_3.

Коэффициент теплопроводности образцов исследуемого полимерного композита $\lambda_к$ определяли по выражению [19]

$$\lambda_к = \frac{\lambda_2 l_1 (T_2 - T_3) S d\tau}{S d\tau l_2 (T_1 - T_2)} = \lambda_c \frac{l_1}{l_2} \frac{(T_2 - T_3)}{(T_1 - T_2)},$$

где l_1 и l_2 – соответственно толщина дисков 8 и 6, м; λ_c – коэффициент теплопроводности оргстекла, Вт/м·К; T_1, T_2, T_3 – температуры металлических стержней.

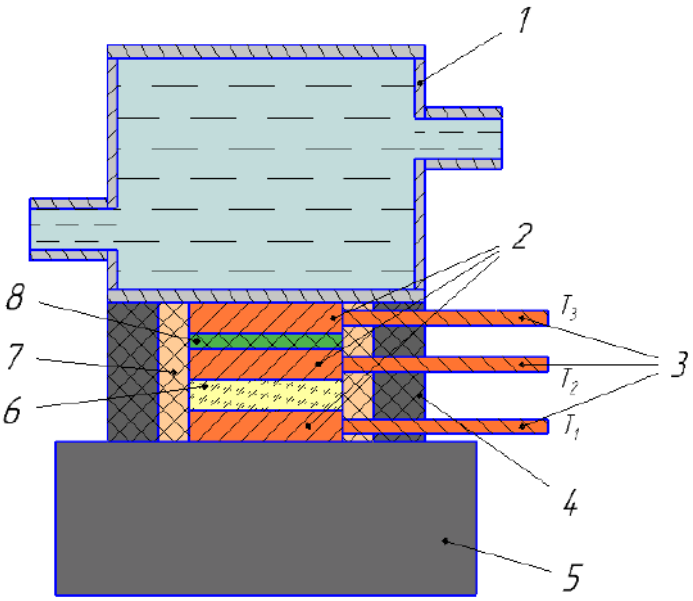

Рисунок 1 - Схема установки для исследования теплопроводности полимерных материалов: 1 – холодильник; 2 – медные диски; 3 – металлические стержни; 4 – резиновая втулка; 5 – нагреватель; 6 – диск из оргстекла; 7 – труба ПВХ; 8 – исследуемый образец [12]

Результаты исследования. На начальном этапе рассчитали по известным формулам теплопроводность полимерного двухкомпонентного композита (состав №1) с содержанием наполнителя $\varphi_н = 0{,}02$ [20]:

Формула Максвелла [21]

$$\lambda_к = \lambda_п \left[\frac{\lambda_н + 2\lambda_п - 2\varphi_н(\lambda_п - \lambda_н)}{\lambda_н + 2\lambda_п + \varphi_н(\lambda_п - \lambda_н)} \right], \qquad (1)$$

где $\lambda_п$ и $\lambda_н$ – коэффициенты теплопроводности полимерной матрицы и наполнителя.

Результат расчета по формуле (1): $\lambda_к = 0{,}29$ Вт/м×К.

Формула Оделевского [20]

$$\lambda_к = \lambda_п \left[1 - \frac{\varphi_н}{\left(\frac{1}{1-\nu}\right) - \left(\frac{1-\varphi_н}{3}\right)} \right], \qquad (2)$$

где $\nu = \lambda_н / \lambda_п$.

Результат расчета по формуле (2): $\lambda_к = 0{,}29 Вт/м \times К$.

Формула Дульнева Г.Н.

$$\lambda_к = \lambda_п \left[\frac{\nu - (\nu - 1)(1 - \varphi_н^{2/3})\varphi_н^{1/3}}{\nu - \varphi_н^{1/3}(\nu - 1)} \right] \qquad (3)$$

Результат расчета по формуле (3): $\lambda_к = 0{,}28 Вт/м \times К$.

Расчет теплопроводности композита по формулам (1) и (2) показал одинаковый результат: $\lambda_к = 0{,}29$ Вт/м×К. Расчет по формуле (3) показал несколько меньший результат: $\lambda_к = 0{,}28$ Вт/м×К. Фактическое значение коэффициента теплопроводности композита состава №1 составляет $\lambda_к = 24{,}7$ Вт/м×К.

Таким образом, если расчет теплопроводности микрокомпозитов по формулам Оделевского и Миснара занижает результат, в сравнении с фактическим значением теплопроводности, в 1,4 – 1,6 раза и несколько более, формулы (1)…(3) занижают расчетные значения теплопроводности эластомерных нанокомпозитов от 85,2 до 88,2 раза. Поэтому вышеприведенные формулы не пригодны для расчета теплопроводности полимерных нанокомпозитов.

Рассмотрим причины такой большой разницы между расчетными и экспериментальными значениями теплопроводности полимерных нанокомпозитов. Процесс теплового переноса в полимерных композитах определяется в значительной мере тремя факторами:

- агрегирование частиц, благодаря чему при определенных условиях между частицами наполнителя возникают проводящие «мостики» и реализуется эффект прыжковой проводимости;
- наличие межфазных слоев, свойства которых значительно отличаются от свойств полимерной матрицы;
- наличие пористости в полимерном композите.

Теоретическая оценка влияния всех факторов на перенос тепла в гетерогенной полимерной системе с наполнителями представляет собой сложную, трудно разрешимую задачу. В инженерной практике сходимость известных аналитических формул расчета коэффициента теплопроводности с фактическими значениями, полученными экспериментально, обеспечивают разработкой расчетных формул, полученных при помощи метода инверсии компонентов.

В работе [18] авторы предложили метод расчета теплопроводности трехкомпонентного композита на основе множественной регрессии. Адекватность полученной регрессионной модели опре-

деляют сопоставлением расчетных значений теплопроводности с фактическими, полученными в ходе контрольного эксперимента.

Метод реализован при исследовании теплопроводности трехкомпонентных микрокомпозитов на основе двух различных полимерных матриц: диметилсилоксанового каучука СКТН-А и полиуретана Сурэл-7, наполненных кварцем молотым пылевидным, алюминия нитридом и электрокорундом. В итоге получена формула для расчета теплопроводности трехкомпонентного композита

$$\lambda_к\left[\varphi_n + C(\varphi_1 + \varphi_2)\right] = \lambda_n\varphi_n + C(\lambda_1\varphi_1 + \lambda_2\varphi_2)\,, \qquad (4)$$

где φ_1 и φ_2 – объемное содержание наполнителей; С – поправочный коэффициент, учитывающий отношение теплопроводности наполнителя к теплопроводности полимерной матрицы.

$$\mathrm{C} = f\left(\frac{\lambda_н}{\lambda_n}\right) \qquad (5)$$

Применительно к исследованиям в работе [18] коэффициент с в формуле (4) имеет значение $\mathrm{C} = \left(\frac{\lambda_н}{\lambda_n}\right)^{-0,65}$.

Формула (4) подобна формуле Бургера, однако она предназначена для трехкомпонентного композита. Оригинальность этой формулы заключается в том, что не требуется инверсия компонентов и в ней используется зависимость $\mathrm{C} = f\left(\frac{\lambda_н}{\lambda_n}\right)$.

В настоящих исследованиях проведена оценка возможности применения формул Бургера, в сочетании с результатами экспериментальных исследований, для расчета двухкомпонентных полимерных нанокомпозитов.

Расчетные значения коэффициента теплопроводности двухкомпонентных полимерных композитов при различном содержании наполнителя рассчитывали по формуле Бургера [22]

$$\lambda_к\left(\varphi_n + C\varphi_н\right) = \lambda_n\varphi_n + C\lambda_н\varphi_н\,, \qquad (6)$$

где с – коэффициент, $\mathrm{C} = \left(\frac{\lambda_н}{\lambda_n}\right)^{\alpha}$.

Экспериментально определили значения коэффициента теплопроводности эластомерных нанокомпозитов с оптимальными составами, при которых достигаются наиболее высокие деформационно-прочностные и адгезионные свойства материалов. Состав №1: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч., алюминиевый нанопорошок – 0,075 масс.ч (в объемных долях – 0,02). Состав №2: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч., углеродные нанотрубки «Таунит» – 0,1 масс.ч. (в объемных долях – 0,036).

Поясним выбор составов. Одним из условий достижения высоких механических свойств композита является наиболее равномерное распределение частиц наполнителя по всему объему полимерной матрицы, а также минимальное агрегирование частиц. При расчете коэффициента теплопроводности по аналитическим формулам (1)…(6) предполагается, что частицы равномерно распределены по объему матрицы. Поэтому расчетное и экспериментальное значения теплопроводности, в сравнении с другим содержанием наполнителя, будут иметь наименьшее расхождение при оптимальном составе композита.

Результаты эксперимента:

состав №1: $\lambda_к = 24{,}7$ Вт/ м×К, состав №2: $\lambda_к = 9{,}3$ Вт/м×К

Затем по формуле (6) определили значение поправочного коэффициента С и рассчитали значения коэффициента теплопроводности нанокомпозитов с массовым содержанием алюминиевого

нанопорошка $m_н = 0{,}025; 0{,}05$ и $0{,}1$ масс.ч. (в объемных долях соответственно: $\varphi_н = 0{,}0066; 0{,}0\,131$ и $0{,}026$).

Результаты расчета по формуле (6):

$$C = \left(\frac{\lambda_н}{\lambda_п}\right)^{\alpha} = \left(\frac{209{,}3}{0{,}27}\right)^{0{,}281} = 6{,}4847\ ;$$

$$\lambda_к\left(\varphi_п + 6{,}4847\,\varphi_н\right) = \lambda_п\varphi_п + 6{,}4847\,\lambda_н\varphi_н \qquad (7)$$

$$\lambda_к = 8{,}9; 16{,}9 и 31{,}1 Вт/м \times К\ .$$

Значения коэффициента теплопроводности нанокомпозитов с массовым содержанием углеродных нанотрубок «Таунит» $m_н = 0{,}05;$ и $0{,}15$ масс.ч. (в объемных долях соответственно: $\varphi_н = 0{,}0184$ и $0{,}053$).

Результаты расчета по формуле (6):

$$C = \left(\frac{\lambda_н}{\lambda_п}\right)^{\alpha} = \left(\frac{6600}{0{,}27}\right)^{-0{,}0328} = 0{,}0367\ ;$$

$$\lambda_к\left(\varphi_п + 0{,}0367\,\varphi_н\right) = \lambda_п\varphi_п + 0{,}0367\,\lambda_н\varphi_н \qquad (8)$$

$$\lambda_к = 4{,}75 \text{ и } 13{,}65 \text{ Вт/м} \times \text{К}\ .$$

На следующем этапе экспериментально определили коэффициенты теплопроводности нанокомпозитов с массовым содержанием алюминиевого нанопорошка $\varphi_н = 0{,}025; 0{,}05$ и $0{,}1$ масс.ч , углеродных нанотрубок – $m_н = 0{,}05$ и $0{,}15$ масс.ч

Проверку экспериментальных значений теплопроводности нанокомпозитов на наличие «выпадающих» точек проводили по критерию Романовского, воспроизводимость эксперимента (однородность дисперсий) по критерию Кохрена при уровне значимости 0,05 [23].

На рис. 2 показаны экспериментальные и расчетные значения коэффициента теплопроводности $\lambda_к$ эластомерного нанокомпозита при различном содержании алюминиевого нанопорошка.

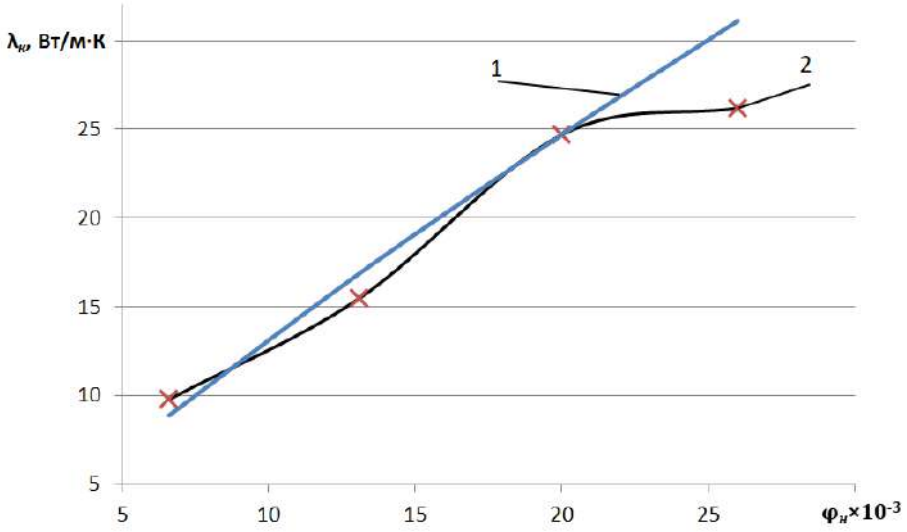

Рисунок 2 - Зависимость коэффициента теплопроводности $\lambda_к$ эластомерного нанокомпозита от объемного содержания алюминиевого нанопорошка $\varphi_н$: 1 – расчетная зависимость; 2 – экспериментальная зависимость

При содержании наполнителя $\varphi_н = 6{,}6 \times 10^{-3}$ расчетное значение коэффициента теплопроводности составляет $\lambda_к = 8{,}9$ Вт/м×К, а экспериментальное – $\lambda_к = 9{,}9$ Вт/м×К. Значения теплопроводности отличаются на 11%. При увеличении содержания наполнителя вдвое до $\varphi_н = 13{,}1 \times 10^{-3}$ расчетное значение коэффициента теплопроводности составляет $\lambda_к = 16{,}9$ Вт/м×К, а экспериментальное – $\lambda_к = 15{,}5$ Вт/м×К. Разница между расчетным и фактическим значениями величины $\lambda_к$ составляет 9%. При дальнейшем повышении содержания наполнителя скорость прироста теплопроводности резко снижается и зависимость 2 становится не линейной. Фактическое значение коэффициента теплопроводности нанокомпозита с максимальным содержанием наполнителя $\varphi_н = 26 \times 10^{-3}$ составляет $\lambda_к = 26{,}2$ Вт/м×К, а расчетное значительно больше – $\lambda_к = 31{,}1$ Вт/м×К. Значения теплопроводности отличаются на максимальную величину в 19%. Основной причиной можно назвать агрегирование наночастиц алюминия.

Аналогичная картина имеет место при исследовании нанокомпозита, наполненного углеродными нанотрубками «Таунит». На рис. 3 показаны экспериментальные и расчетные значения коэффициента теплопроводности $\lambda_к$ эластомерного нанокомпозита при различном содержании углеродных нанотрубок. При содержании наполнителя $\varphi_н = 18{,}4 \times 10^{-3}$ расчетное значение коэффициента теплопроводности составляет $\lambda_к = 4{,}75$ Вт/м×К, а экспериментальное – $\lambda_к = 5{,}65$ Вт/м×К. Значения теплопроводности отличаются на 19%.

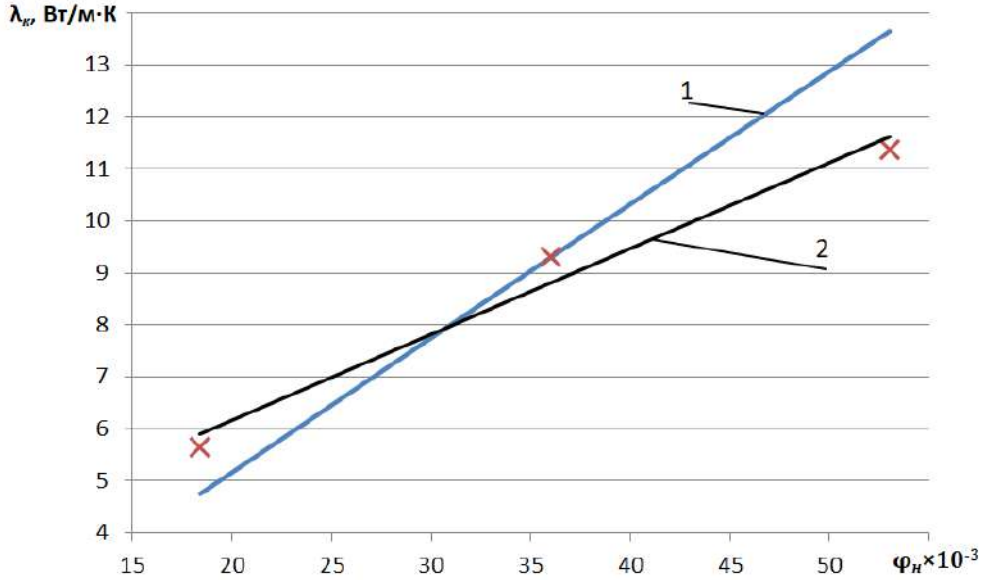

Рисунок 3 - Зависимость коэффициента теплопроводности $\lambda_к$ эластомерного нанокомпозита от объемного содержания углеродных нанотрубок $\varphi_н$: 1 – расчетная зависимость; 2 – экспериментальная зависимость

При увеличении содержания наполнителя до $\varphi_н = 53 \times 10^{-3}$ расчетное значение коэффициента теплопроводности составляет $\lambda_к = 13{,}65$ Вт/м×К, а экспериментальное – $\lambda_к = 11{,}37$ Вт/м×К. Разница между расчетным и фактическим значениями величины $\lambda_к$ составляет 20%.

Таким образом, формула Бургера, в сочетании с результатами экспериментальных исследований, позволяет с достаточной точностью рассчитывать теплопроводность двухкомпонентных полимерных нанокомпозитов.

Выводы.

1. Расчет теплопроводности полимерных нанокомпозитов по известным аналитическим формулам дает, в сравнении с фактическими, значения, заниженные до 89 раз.

2. Формула Бургера, в сочетании с экспериментальными исследованиями, позволяет получить адекватную модель теплопроводности двухкомпонентных полимерных нанокомпозитов.

Список литературы

1. Кононенко А.С., Дмитраков К.Г. Повышение стойкости полимерных композитов холодного отверждения к воздействию рабочих жидкостей использованием наноматериалов // Международный технико-экономический журнал. 2015. № 1. С. 89–94.

2. Жачкин С.Ю., Пеньков Н.А., Мандрыкин И.А., Беленцов В.Г. Интенсификация восстановления деталей сельхозмашин дисперсно-упрочненным композитным покрытием на основе хрома // Инновации в сельском хозяйстве. 2019. №3 (32). С. 49-54.

3. Коломейченко, А.В. Технология восстановления с упрочнением деталей машин на основе применения микродугового оксидирования / Коломейченко А.В., Кравченко И.Н., Пузряков А.Ф., Логачёв В.Н., Титов Н.В. Строительные и дорожные машины. 2014. № 10. С. 16-21.

4. Технологии восстановления и упрочнения деталей автотракторной техники / Р.И. Ли // Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2014. – 379 с.

5. Ли, Р. И. Полимерные композиционные материалы для фиксации подшипников качения в узлах машин монография / Р.И. Ли. – Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2017. − 224 с.

6. R. I. Li, D. N. Psarev, M. R. Kiba. Teoretical Concerns in Selection of Metall Nanosized Fillers for the F-40 Elastomer Composition. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials, 2019, Vol. 12, No. 1, pp. 15-19.

7. R. I. Li, D. N. Psarev. A Model for Forming a Uniform Polymer Coating on the External Surface of a Rotating Cylinder. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials, 2015, Vol. 8, No. 3, pp. 249–252.

8. Ли, Р.И. Перспективный полимерный материал для восстановления корпусных деталей машин [Текст] / Р.И. Ли, Д.Н. Псарев, А.В. Мироненко, М.Р. Киба // Клеи. Герметики. Технологии – 2017. – №5. – С. 34-37.

9. Бочаров, А. В. Повышение эффективности восстановления неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники адгезивами, наполненными дисперсными металлическими порошками [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03: / Бочаров А. В. – Мичуринск, 2009. – 150 с.

10. Бутин, А. В. Повышение эффективности восстановления неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники полимер-полимерными композициями [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03: / Бутин А. В. – Мичуринск, 2012. – 127 с.

11. Малюгин, В. А. Восстановление посадок подшипников качения автомобилей нанокомпозитом на основе анаэробного герметика АН-111: дис. ...канд. техн. наук: 05.20.03: / Малюгин В. А. – Мичуринск, 2019. – 169 с.

12. R. I. Li, D. N. Psarev, V. A. Malyugin. A Polymeric Nanocomposite for Fixing Bearings during Assembly and Repair of Equipment. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D, 2019, Vol. 12, No. 3, pp. 261-265.

13. Мищенко С.В., Ткачев А.Г. Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.

14. Михайлюк, А. Е. Разработка эластомерных материалов на основе этиленпропиленовых каучуков, модифицированных высокодисперсными частицами металлов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Михайлюк А.Е. – Волгоград, 2014. – 140 с.

15. Помогайло, А. Д. Наночастицы металлов в полимерах / А. Д. Помогайло, А. С. Розенберг, И. Е. Уфлянд. – Москва: Химия, 2000. – 672 с.

16. Кособудский, И. Д. Наноразмерные металлические частицы в полимерных матрицах: I. Синтез, механизмы образования и стабилизации / И. Д. Кособудский // Известия высших учебных заведений. – 2000. – Т. 43 (4). – С. 3-18.

17. Полимерные нанокомпозиты: многообразие структурных форм и приложений / А.К. Микитаев, Г.В. Козлов, Г.Е. Заиков; Ин-т биохим. физики им. Н.М. Эмануэля РАН. – М.: Наука, 2009.

– 278 с.

18. Моделирование теплопроводности трехкомпонентных композиций / В.А. Михеев, В.Ш. Сулаберидзе, В.Д. Мушенко // ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ПРИБОРОСТРОЕНИЕ. 2016. Т. 59, №7. – С. 584-590.

19. Михеев, В. А. Исследование теплопроводности композиционных материалов на основе силикона с наполнителями / Михеев В. А., Сулаберидзе В. Ш., Мушенко В. Д. // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 7. С. 571–575.

20. Теплопроводность смесей и композиционных материалов / справочная книга / Г.Н. Дульнев, Ю.П. Заричняк – Л.: изд-во «Энергия», 1974. – 264 с.

21. Киба, М.Р. Восстановление посадочных отверстий в корпусных деталях сельскохозяйственной техники нанокомпозитом на основе эластомера Ф-40 [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Киба М.Р. – Мичуринск, 2020. – 164 с.

22. А.Ф. Чудновский. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. М.: ФИЗМАТГИЗ, 1962. – 456 с.

23. Основы научных исследований [Текст]: Учеб. пособие / Р.И. Ли // Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2013. – 190 с.

References

1. Kononenko A.S., Dmitrakov K.G. Povyshenie stojkosti polimernyh kompozitov holodnogo otverzhdeniya k vozdejstviyu rabochih zhidkostej ispol'zovaniem nanomaterialov // Mezhdunarodnyj tekhniko-ekonomicheskij zhurnal. 2015. № 1. S. 89–94.

2. ZHachkin S.YU., Pen'kov N.A., Mandrykin I.A., Belencov V.G. Intensifikaciya vosstanovleniya detalej sel'hozmashin dispersno-uprochnennym kompozitnym pokrytiem na osnove hroma // Innovacii v sel'skom hozyajstve. 2019. №3 (32). S. 49-54.

3. Kolomejchenko, A.V. Tekhnologiya vosstanovleniya s uprochneniem detalej mashin na osnove primeneniya mikrodugovogo oksidirovaniya / Kolomejchenko A.V., Kravchenko I.N., Puzryakov A.F., Logachyov V.N., Titov N.V. Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. 2014. № 10. S. 16-21.

4. Tekhnologii vosstanovleniya i uprochneniya detalej avtotraktornoj tekhniki / R.I. Li // Lipeck: Izd-vo LGTU, 2014. – 379 s.

5. Li, R. I. Polimernye kompozicionnye materialy dlya fiksacii podshipnikov kacheniya v uzlah mashin monografiya / R.I. Li. – Lipeck: Izd-vo Lipeckogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2017. − 224 s.

6. R. I. Li, D. N. Psarev, M. R. Kiba. Teoretical Concerns in Selection of Metall Nanosized Fillers for the F-40 Elastomer Composition. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials, 2019, Vol. 12, No. 1, pp. 15-19.

7. R. I. Li, D. N. Psarev. A Model for Forming a Uniform Polymer Coating on the External Surface of a Rotating Cylinder. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials, 2015, Vol. 8, No. 3, pp. 249–252.

8. Li, R.I. Perspektivnyj polimernyj material dlya vosstanovleniya korpusnyh detalej mashin [Tekst] / R.I. Li, D.N. Psarev, A.V. Mironenko, M.R. Kiba // Klei. Germetiki. Tekhnologii – 2017. – №5. – S. 34-37.

9. Bocharov, A. V. Povyshenie effektivnosti vosstanovleniya nepodvizhnyh soedinenij podshipnikov kacheniya sel'skohozyajstvennoj tekhniki adgezivami, napolnennymi dispersnymi metallicheskimi poroshkami [Tekst]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.20.03: / Bocharov A. V. – Michurinsk, 2009. – 150 s.

10. Butin, A. V. Povyshenie effektivnosti vosstanovleniya nepodvizhnyh soedinenij podshipnikov kacheniya sel'skohozyajstvennoj tekhniki polimer-polimernymi kompoziciyami [Tekst]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.20.03: / Butin A. V. – Michurinsk, 2012. – 127 s.

11. Malyugin, V. A. Vosstanovlenie posadok podshipnikov kacheniya avtomobilej nanokompozitom na osnove anaerobnogo germetika AN-111: dis. ...kand. tekhn. nauk: 05.20.03: / Malyugin V. A. – Michurinsk, 2019. – 169 s.

12. R. I. Li, D. N. Psarev, V. A. Malyugin. A Polymeric Nanocomposite for Fixing Bearings during Assembly and Repair of Equipment. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D, 2019, Vol. 12, No. 3, pp. 261-265.

13. Mishchenko S.V., Tkachev A.G. Uglerodnye nanomaterialy. Proizvodstvo, svojstva, primenenie. – M.: Mashinostroenie, 2008. – 320 s.

14. Mihajlyuk, A. E. Razrabotka elastomernyh materialov na osnove etilenpropilenovyh kauchukov, modificirovannyh vysokodispersnymi chasticami metallov [Tekst]: dis. ... kand. tekhn. nauk / Mihajlyuk A.E. – Volgograd, 2014. – 140 s.

15. Pomogajlo, A. D. Nanochasticy metallov v polimerah / A. D. Pomogajlo, A. S. Rozenberg, I. E. Uflyand. – Moskva: Himiya, 2000. – 672 s.

16. Kosobudskij, I. D. Nanorazmernye metallicheskie chasticy v polimernyh matricah: I. Sintez, mekhanizmy obrazovaniya i stabilizacii / I. D. Kosobudskij // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. – 2000. – T. 43 (4). – S. 3-18.

17. Polimernye nanokompozity: mnogoobrazie strukturnyh form i prilozhenij / A.K. Mikitaev, G.V. Kozlov, G.E. Zaikov; In-t biohim. fiziki im. N.M. Emanuelya RAN. – M. : Nauka, 2009. – 278 s.

18. Modelirovanie teploprovodnosti trekhkomponentnyh kompozicij / V.A. Miheev, V.SH. Sulaberidze, V.D. Mushenko // IZVESTIYA VUZOV. PRIBOROSTROENIE. 2016. T. 59, №7. – S. 584-590.

19. Miheev, V. A. Issledovanie teploprovodnosti kompozicionnyh materialov na osnove silikona s napolnitelyami / Miheev V. A., Sulaberidze V. SH., Mushenko V. D. // Izv. vuzov. Priborostroenie. 2015. T. 58, № 7. S. 571–575.

20. Teploprovodnost' smesej i kompozicionnyh materialov / spravochnaya kniga / G.N. Dul'nev, YU.P. Zarichnyak – L.: izd-vo «Energiya», 1974. – 264 s.

21. Kiba, M.R. Vosstanovlenie posadochnyh otverstij v korpusnyh detalyah sel'skohozyajstvennoj tekhniki nanokompozitom na osnove elastomera F-40 [Tekst]: dis. ... kand. tekhn. nauk / Kiba M.R. – Michurinsk, 2020. – 164 s.

22. A.F. CHudnovskij. Teplofizicheskie harakteristiki dispersnyh materialov. M.: FIZMATGIZ, 1962. – 456 s.

23. Osnovy nauchnyh issledovanij [Tekst]: Ucheb. posobie / R.I. Li // Lipeck: Izd-vo LGTU, 2013. – 190 s.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Ли Роман Иннакентьевич – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», Россия, г. Липецк, e-mail: romanlee@list.ru.

Псарев Дмитрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», Россия, г. Мичуринск, e-mail: psarev_380@mail.ru.

Киба Мария Романовна – кандидат технических наук, ассистент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный горный университет», Россия, г. Санкт-Петербург, e-mail: damsel_91@mail.ru.

Мельников Антон Юрьевич – аспирант, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», Россия, г. Липецк, e-mail: reks1r@yandex.ru.

Быконя Андрей Николаевич – аспирант, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», Россия, г. Липецк, e-mail: loseroff@mail.ru.

Author credentials

Affiliations

Lee Roman – Doctor of Technical Sciences, Professor, Lipetsk State Technical University, Russia, Lipetsk, e-mail: romanlee@list.ru.

Psarev Dmitry – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Michurinsk State Agrarian University, Russia, Michurinsk, e-mail: psarev_380@mail.ru.

Kiba Maria – Candidate of Technical Sciences, assistant, St. Petersburg State Mining University, Russia, St. Petersburg, e-mail: damsel_91@mail.ru.

Melnikov Anton – post-graduate student, Lipetsk State Technical University, Russia, Lipetsk, e-mail: reks1r@yandex.ru.

Bykonya Andrey – PhD student, Lipetsk State Technical University, Russia, Lipetsk, e-mail: loseroff@mail.ru

Поступила в редакцию (Received): 30.01.2022 Принята к публикации (Accepted): 19.02.2022