исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: vitin-10.pet@mail.ru.

Таха Фирас – доктор сельскохозяйственных машин и оборудования в Техническом колледже Аль-Муссаиба Технического университета «Аль-Фурат Аль-Авсат», Ирак, г. Вавилон, e-mail: engineer.firas@mail.ru.

Author credentials

Affiliations

Petrashchev Alexandr – Full Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: vitin-10.pet@mail.ru.

Firas Taha – Doctor of Agricultural Machinery and equipment at the Technical Collage of Al-Mussaib, “Al-Furat Al-Awsat” Technical University, Iraq, Babylon, e-mail: engineer.firas@mail.ru.

Поступила в редакцию (Received): 11.01.2021 Принята к публикации (Accepted): 12.02.2021

УДК 621.822.6.004.67: 668.3: 631.3.02

DOI: 10.35887/2305-2538-2021-1-69-79

ЭЛАСТОМЕРНЫЙ НАНОКОМПОЗИТ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНОШЕННЫХ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ АВТОТРАКТОРНОЙ ТЕХНИКИ

¹Ли Роман Иннакентьевич

²Псарев Дмитрий Николаевич

³Киба Мария Романовна

¹ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»

²ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет»

³ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

Реферат. Восстановление изношенных корпусных деталей обеспечивает существенное снижение расхода денежных средств на ремонт автотракторной техники, уменьшение экологической нагрузки благодаря сокращению потребности в электрической энергии, металлах, меньшему загрязнению окружающей среды. В работе проанализированы недостатки большинства распространенных способов восстановления корпусных деталей. Предложено для этих целей использовать полимерные нанокompозиты, не требующие сложного технологического оборудования, больших затрат ремонтных материалов и электроэнергии, обеспечивающие повышение эффективности технологии восстановления и послеремонтного ресурса корпусных деталей и подшипниковых узлов, снижающие стоимость материала. Изучали влияние металлических наночастиц на теплофизические и механические свойства нанокompозита на основе эластомера Ф-40, наполненного наночастицами меди и алюминия. Установлено, что наночастицы меди, благодаря высокой энергии ионизации, образуют прочные хемосорбционные связи с макромолекулами каучука СКН-40, которые обеспечивают стабилизирующий эффект при термической деструкции и повышают термостойкость эластомера. Наполнение эластомера Ф-40 наночастицами меди и алюминия повышает модуль упругости, прочность и долговечность выносливость материала. Ввод металлических наночастиц в полимерную матрицу, приводит к образованию сетчатых образований с наночастицами в полимерных цепях. Наполнение эластомера Ф-40 наночастицами меди и алюминия повышает теплостойкость и теплопроводность нанокompозита и значительно увеличивает теплоотвод от деталей восстановленного подшипникового узла. Температура деталей подшипникового узла, с посадкой, восстановленной нанокompозитом эластомера Ф-40, ниже до 16 °С, в сравнении с ненаполненным материалом. Новым эластомерным нанокompозитом рекомендуется восстанавливать корпусные детали автотракторной техники с диаметральной износом посадочных отверстий под подшипники до 0,25 мм.

Ключевые слова: эластомер, нанокompозит, теплофизические и механические свойства, корпусная деталь, восстановление.

**ELASTOMERIC NANOCOMPOSITE FOR RESTORATION
WORN-OUT BODY PARTS VEHICLES AND TRACTORS**¹*Li Roman*²*Psarev Dmitry*³*Kiba Maria*¹*FSBEI HE "Lipetsk State Technical University"*²*FSBEI HE "Michurinsk State Agrarian University"*³*FSBEI HE "St. Petersburg State University of Architecture and Construction"*

Abstract. *The restoration of worn-out body parts provides a significant reduction in the expenditure of funds for the repair of automotive and tractor equipment, a decrease in the environmental load due to a reduction in the need for electric energy, metals, and less environmental pollution. Disadvantages of most common methods of restoring body parts are analyzed in operation. Polymer nanocomposites that do not require complex technological equipment, large expenditures of repair materials and electricity, providing an increase in the efficiency of the recovery technology and postrepair service life of body parts and bearing assemblies, reducing the cost of material, it is proposed to use for these purposes. The effect of metal nanoparticles on the thermophysical and mechanical properties of a nanocomposite based on an F-40 elastomer filled with copper and aluminum nanoparticles was studied. It has been established that copper nanoparticles, due to their high ionization energy, form strong chemisorption bonds with the macromolecules of SKN-40 rubber, which provide a stabilizing effect during thermal destruction and increase the thermal stability of the elastomer. Filling the F-40 elastomer with copper and aluminum nanoparticles increases the modulus of elasticity, strength and durability of the material. The introduction of metal nanoparticles into a polymer matrix leads to the formation of network structures with nanoparticles in polymer chains. Filling the F-40 elastomer with copper and aluminum nanoparticles increases the heat resistance and thermal conductivity of the nanocomposite and significantly increases the heat removal from the parts of the restored bearing assembly. The temperature of the parts of the bearing assembly, with the fit, restored by the F-40 elastomer nanocomposite, is lower up to 16 °C, in comparison with the unfilled material. It is recommended to use a new elastomeric nanocomposite to restore body parts of automotive vehicles with diametrical wear of bore holes for bearings up to 0.25 mm.*

Keywords: *elastomer, nanocomposite, thermophysical and mechanical properties, body part, restoration.*

Введение. Корпусные детали являются базисными, наиболее материалоемкими и дорогими деталями, ресурс которых определяет долговечность агрегатов и надежность машины в целом. Восстановление изношенных корпусных деталей обеспечивает существенное снижение расхода денежных средств на ремонт автотракторной техники. В сравнении с производством новых деталей, при восстановлении аналогичных деталей потребление металла сокращается до 30 раз [1 – 2]. Благодаря тому, что при восстановлении отсутствует металлургический цикл, для 1 тн стальных деталей требуется меньше: электрической энергии (до 180 кВт/ч), угля (до 0,8 тн), известняка (до 0,5 тн), природного газа (до 175 м³). Современные способы восстановления обеспечивают не только компенсацию износа в детали, но и значительное увеличение ее послеремонтного ресурса, повышение надежности техники после восстановления [3...8]. Одним из основных дефектов, являющихся причиной выбраковки корпусных деталей автотракторной техники, является износ посадочных отверстий под подшипники качения. Данный дефект устраняют нанесением гальванических покрытий, электроконтактной приваркой стальной ленты, различными способами наплавки и другими способами основным недостатками которых являются: сложность технологического оборудования и процесса, энергоемкость, необходимость механической обработки отверстий.

Способы восстановления корпусных деталей полимерными материалами не требуют сложного технологического оборудования и высокой квалификации ремперсонала, больших затрат ремонтных материалов и электроэнергии, обеспечивают повышение послеремонтного ресурса корпусных деталей и подшипниковых узлов, валов и шестерен [9 – 11]. Перспективным

направлением, обеспечивающим высокую эффективность восстановления корпусных деталей автотракторной техники, является использование полимерных композитов. Благодаря наполнению полимера различными частицами органического и не органического происхождения значительно улучшаются потребительские свойства материала, существенно снижается стоимость материала и повышается эффективность технологии восстановления [12 – 17].

В настоящее время потребителю предлагается большой ассортимент наночастиц из различных материалов, которые отличаются формой, размером и другими параметрами. Благодаря высокой удельной поверхности наночастиц, в единице объема полимерной матрицы, в сравнении с микроразмерными частицами, имеет место значительно большее количество наночастиц. Поэтому существенное улучшение потребительских свойств полимерных нанокомпозитов достигается при относительно низких концентрациях наноразмерных наполнителей (до 5 %) [18 – 21].

Исследования и последующая разработка новых полимерных нанокомпозитов представляют большой научный и практический интерес, так как они обеспечивают в дальнейшем разработку перспективных высокоэффективных технологий восстановления посадочных отверстий, увеличивающих послеремонтный ресурс корпусных деталей, повышающих надежность и существенно снижающих затраты на ремонт автотракторной техники.

К полимерным материалам, используемым при восстановлении изношенных посадочных отверстий в корпусных деталях агрегатов трансмиссии автомобилей и тракторов, предъявляются специфические требования. Чтобы иметь высокий ресурс, с учетом эксплуатационной температуры подшипникового узла, термоциклирования, необходимости теплоотвода от трущихся деталей подшипника, знакопеременных динамических нагрузок, условий сборки, материал должен иметь повышенную тепло- и термостойкость, теплопроводность, высокую адгезионную и когезионную прочность, выносливость и др. потребительские свойства [16 – 17].

Цель работы – исследование влияния металлических наночастиц на теплофизические и механические свойства эластомера Ф-40, определение оптимального состава эластомерного нанокомпозита для восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях автотракторной техники.

Материалы и методы. *Повышение термостойкости композита эластомера при введении металлических наночастиц.* Металлы переменной валентности могут быть катализаторами для одних и ингибиторами цепных радикальных процессов окисления для других видов каучука. Характер каталитического действия металла переменной валентности определяет строение каучука. Исследования Пиотровского К.Б. и Львова Ю.А. показали, что медь является катализатором для натурального каучука, а для бутадиен-нитрильных каучуков этот металл – ингибитор процесса окисления [22, 23]. В работе Михайлюк А.Е. установлено, что введение наночастиц металлов переменной валентности в эластомер увеличивает энергию активации процесса термодеструкции полимерного материала, т.е. повышает термостойкость композита [19]. Стабилизирующий эффект при термической деструкции эластомера вызван возникновением хемосорбционных связей между металлическими наночастицами и макромолекулами полимера. Металлы, которые использовали в качестве наполнителей, по степени увеличения термостойкости эластомера к высокотемпературной деструкции можно расположить в следующей последовательности: $Bi < Pb < Ni < Cu$.

В основе эластомера Ф-40 лежит бутадиен-нитрильный каучук СКН-40. Из перечня металлов, медь имеет наиболее высокую энергию ионизации, поэтому следует ожидать, что наночастицы меди образуют с макромолекулами каучука СКН-40 прочные хемосорбционные связи, вследствие чего термостойкость нанокомпозита на основе эластомера Ф-40 увеличится [24].

Модуль упругости эластомерного нанокомпозита В нанокомпозитах при взаимодействии полимера с частицей наполнителя на поверхности последней образуется адсорбированный слой (межфазная область), который свойствами существенно отличается от полимерной матрицы. Имеет место «замораживание» молекулярной подвижности полимера в межфазных областях, т.е. у поверхности наночастиц наполнителя. Частицы наполнителя и межфазные области являются армирующим элементом эластомерного нанокомпозита, повышающим его модуль упругости. В работе Козлова Г.В. исследован композит на основе бутадиен-стирольного каучука, наполненный наношунгитом. Установлено, что модуль упругости межфазного слоя меньше аналогичного параметра наполнителя только лишь на 23 – 45%, однако больше модуля упругости полимера до

8,5 раз [25]. Ввод лиофилизированных к каучуку высокодисперсных частиц алюминия, марганца, железа оказывает вулканизирующее и усиливающее действие на композиты на основе хлоропренового и бутадиен-нитрильного каучуков [26].

Введение металлических наночастиц в раствор эластомера увеличивает его вязкость. Причиной увеличения вязкости и повышения сопротивления течению являются межфазные области с «замороженной» молекулярной подвижностью полимера в этих (межфазных) областях. Благодаря высокой удельной поверхности наночастиц, эффективное насыщение полимеров наполнителем (достижение экстремальных деформационно-прочностных свойств) достигается при низких концентрациях, до 5 масс.ч.

Особенности повышения прочности и трещиностойкости эластомерных композитов
Влияние адгезии полимера к наполнителю рассмотрено в работе Воюцкого С.С. Адгезионная теория усиления эластомеров рассматривает композит как множество микроскопических адгезионных соединений типа эластомер – частица наполнителя. Установлено, что имеет место линейная зависимость прочности композитов от значений адгезии, которая подтверждает корректность адгезионной теории усиления эластомеров. Увеличение прочности эластомерного композита, который содержит цепочечные структуры, обеспечивается не за счет контакта частиц наполнителя между собой, а благодаря наличию в зазоре, окружающем место контакта, молекул полимера, каждая из которых прочно связана по крайней мере с двумя частицами наполнителя [27].

Различают четыре основных фактора усиления эластомеров: выравнивание напряжений при разрыве связей эластомер-наполнитель, притупление растущих трещин в материале, увеличение рассеивания энергии в объеме материала по линии разрыва, образование цепочечных структур частиц наполнителя между собой [28].

Резины на основе хлоропренового и бутадиен-нитрильного каучуков с высокодисперсными частицами металлов отличаются повышенными деформационно-прочностными свойствами. Причиной являются прочные связи каучук-металл, образующиеся в момент раскрытия двойных связей. Алюминий имеет наиболее высокую удельную поверхностную энергию разрушения. Использование частиц алюминия в качестве наполнителя полимерных материалов повышает поверхностную энергию разрушения, прочность, трещиностойкость и выносливость композитов. Поэтому, наполнение эластомера Ф-40 на основе бутадиен-нитрильного каучука СКН-40, наночастицами алюминия приведет к увеличению прочности и долговечности нанокомпозита [29].

Повышение теплостойкости, и теплопроводности композита эластомера при введении металлических наночастиц. Эластомеры ГЭН-150(В), герметик 6Ф, лаки Ф-40 и Ф-40С, в сравнении с анаэробными герметиками, акриловыми и цианакрилатными адгезивами, отличаются относительно не высокой теплостойкостью. Теплостойкость герметика 6Ф, лаков Ф-40 и Ф-40С, имеющих примерно одинаковую основу составляет около 100°C [9]. Учитывая, что подшипники обычного исполнения нагреваются при работе до температур 70...90°C, необходимо, чтобы полимерные материалы для восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях, обладали большим температурным запасом по теплостойкости.

Наполнение полимерных материалов микроразмерными металлическими частицами практически не изменяет теплостойкость и температуру стеклования композита [30]. Теплостойкость микрокомпозита фактически определяется теплостойкостью полимерной матрицы.

Совершенно другая картина наблюдается в полимерных нанокомпозитах. Наполнение полимерной матрицы металлическими наночастицами, приводит к образованию сетчатых образований с наночастицами в узлах. По этой причине молекулярная подвижность полимерных цепей уменьшается, а теплостойкость соответственно увеличивается. В нанокомпозитах при взаимодействии полимера с частицей наполнителя на поверхности последней образуется адсорбированный слой (межфазная область), который свойствами существенно отличается от полимерной матрицы. Имеет место «замораживание» молекулярной подвижности полимера в межфазных областях, т.е. у поверхности наночастиц наполнителя. Модуль упругости межфазного меньше аналогичного параметра материала наполнителя, но многократно превышает модуль упругости полимера матрицы [25]. В виду высокой удельной поверхности наночастиц наполнителя, доля межфазных областей в полимерном нанокомпозите значительно больше, чем в микрокомпозите. «Замораживание» молекулярной подвижности полимера в межфазных областях,

повышение модуля упругости, являются причиной увеличения теплостойкости нанокompозита в сравнении с не наполненным эластомером.

Наиболее высоким коэффициентом теплопроводности обладают частицы серебра, меди и алюминия. В виду очень высокой цены использование серебра в качестве наполнителя не является экономически целесообразным. По этой причине, для повышения теплопроводности нанокompозита на основе эластомера Ф-40 следует в качестве наполнителей использовать наночастицы меди и алюминия [31].

Результаты и их обсуждение. *Исследование и оптимизация состава нанокompозита.* Априорная информация установила нелинейность зависимости параметра α_p от состава нанокompозита. Активный эксперимент провели по композиционному плану B_2 [32]. Функцией отклика Y принята удельная работа разрушения α_p , МДж/м³, а независимыми факторами: X_1 – содержание наночастиц алюминия, масс.ч., X_2 – содержание наночастиц меди, масс.ч.

В результате регрессионного анализа получено уравнение регрессии:

$$Y = -15,296 + 18,903X_1 + 13,509X_2 - 0,15X_1X_2 - 5,08X_1^2 - 4,08X_2^2$$

Поверхность отклика и её двумерное сечение представлены на рисунках 1 и 2.

Рисунок 1. – Поверхность отклика

Рисунок 2 – Двумерное сечение поверхности отклика

Определен оптимальный состав нанокompозита на основе эластомера Ф-40. Максимальной удельной работой разрушения 13,0 МДж/м³ обладают пленки композита, следующего состава: эластомер Ф-40 – 100 масс.ч., алюминиевого нанопорошка – 1,9 масс. ч. и медного нанопорошка – 1,8 масс. ч. [29]

Исследование модуля упругости нанокompозита. Эксперимент показал, что наполнение эластомера Ф-40 алюминиевыми и медными наночастицами увеличивает модуль упругости материала: на растяжение в 1,2, сжатие – 1,3 раза.

Исследование адгезии нанокompозита. Адгезию полимерных материалов оценивали прочностью связи материала с металлом при отслаивании образцов. Исследовали составы: №1 эластомер Ф-40 – 100 масс. ч., Al – 1 масс. ч., Cu – 0,6 масс. ч.; №2: Ф-40 – 100 масс. ч., Al – 2 масс. ч., Cu – 1,6 масс. ч.; №3: Ф-40 – 100 масс. ч., Al – 3 масс. ч., Cu – 2,6 масс. ч. Минимальную адгезию имеют покрытия эластомера Ф-40, $F = 3310 \text{ Н/м}$. Максимальную адгезию имеют покрытия состава №2. Показатель адгезии составляет $F = 9560 \text{ Н/м}$ и превышает аналогичный параметр не наполненного эластомера в 2,89 раза, покрытий состава №1 и №3 – 1,57 и 1,17 раза.

Поэтому, с учетом результатов проведенного активного эксперимента, принят оптимальный состав нанокompозита: раствор эластомера Ф-40 – 100 масс. ч., нанопорошок алюминия – 2,0 масс. ч., нанопорошок меди – 1,6 масс. ч. Этот состав обладает наиболее высокими деформационно-прочностными и адгезионными свойствами.

Исследование теплостойкости нанокompозита. Теплостойкость полимерного материала является важнейшей эксплуатационной характеристикой, определяющей предельную допустимую температуру использования материала в реальных условиях эксплуатации.

На рисунке 3 показаны результаты исследования теплостойкости покрытий эластомера Ф-40 и нанокompозита на его основе.

Как следует из рисунка 3 теплостойкость не наполненного эластомера Ф-40 составляет 100 °C. Теплостойкость, при наполнении эластомера нанопорошками меди и алюминия, повысилась в сравнении с не наполненным эластомером в 1,23 раза и составила 123 °C.

Сравнительные исследования теплопроводности материалов. Полимерные материалы относятся к категории теплоизоляторов, так как их теплопроводность отличается в меньшую сторону от аналогичного параметра черных металлов приблизительно в 100 раз. По этой причине возможно ухудшение теплоотвода в восстановленных подшипниковых узлах в условиях эксплуатации. В тяжело нагруженных подшипниковых узлах техники увеличение температуры полимерного материала из-за гистерезисных потерь, затрудненный теплоотвод могут стать причиной существенного повышения температуры подшипника и смазочного материала и, при определенных условиях, понижения долговечности подшипникового узла.

Результаты исследований теплопроводности эластомера Ф-40 и нанокompозита на его основе показаны на рисунке 4.

Рисунок 4 – Коэффициент теплопроводности эластомера Ф-40 и нанокompозита на его основе

Как видно из рисунка 4, у образцов эластомера Ф-40 значение коэффициента теплопроводности составило $\lambda_k = 0,56 \text{ Вт/м К}$. Образцы нанокompозита показали значение

коэффициента теплопроводности $\lambda_k = 21,8 \text{ Вт/м К}$. Благодаря вводу в эластомер наночастиц алюминия и меди коэффициент теплопроводности увеличился в 38,9 раза.

Сравнительные исследования термостойкости материалов. Медь является ингибитором процесса окисления бутадиен-нитрильных каучуков [24], поэтому в нашей работе предложено наполнять эластомер Ф-40 наночастицами меди, что позволит связать свободные радикалы, образующиеся при термораспаде и повысить термостойкость эластомера.

Исследования термостойкости эластомера Ф-40 и нанокомпозита на его основе проводили, измеряя прочность и деформацию образцов материала при одноосном растяжении до и после старения, которое проводили в условиях ограниченного доступа воздуха кислорода при температуре 250 °С в течение 2 ч. На рисунке 5 показаны коэффициенты старения по прочности K_σ и относительному удлинению K_ϵ эластомера Ф-40 и его нанокомпозита. Термостойкость нанокомпозита, в сравнении с не наполненным эластомером Ф-40, существенно повысилась. Коэффициенты старения нанокомпозита больше аналогичных показателей полимерной матрицы, что является подтверждением увеличения термостойкости нанокомпозита: по прочности K_σ увеличился в 1,8 раза (от 0,2 до 0,36); по деформации K_ϵ повысился в 1,4 раза (от 0,1 до 0,14).

1 – эластомер Ф-40; 2 – нанокомпозит на его основе [24]

Рисунок 5 – Коэффициенты старения по условной прочности K_σ и относительному удлинению K_ϵ

Исследование долговечности и теплового баланса посадок подшипников, восстановленных нанокомпозитом эластомера Ф-40. Стендовые испытания показали, что наполнение эластомера Ф-40 металлическими наночастицами повышает выносливость материала и соответственно долговечность восстановленных посадок подшипников в корпусной детали при циклическом нагружении. Максимальная допустимая толщина покрытия эластомера Ф-40 составляет 0,1 мм, а его нанокомпозита – 0,125 мм (рисунок 6).

Рисунок 6 – Зависимость ресурса полимерных посадок t подшипника 209 от толщины h покрытия из нанокомпозита на основе эластомера Ф-40 [31]

Поэтому новым эластомерным нанокompозитом следует восстанавливать посадочные отверстия в корпусных деталях с диаметральной износом до 0,25 мм [31].

Исследования теплового баланса показали, что наполнение эластомера Ф-40 нанопорошками алюминия и меди существенно повышает теплопроводность полимерного покрытия и увеличивает теплоотвод от деталей восстановленного подшипникового узла. Температура втулки подшипникового узла с посадкой, восстановленной нанокompозитом эластомера Ф-40, составила 44, 49 и 54 °С при значениях циклической радиальной нагрузки $P = 9,9; 15,8$ и $20,0$ кН соответственно, что на 6,4; 10,9 и 22,8 % меньше, чем у не наполненного эластомера.

Температура наружного кольца подшипникового узла с посадкой, восстановленной нанокompозитом эластомера Ф-40, составила 37, 40 и 43 °С при значениях циклической радиальной нагрузки 9,9; 15,8 и 20,0 кН соответственно, что на 7,5; 9,1 и 10,4 % меньше, чем у не наполненного эластомера.

Выводы.

1. Наночастицы меди, благодаря высокой энергии ионизации, взаимодействуя с макромолекулами каучука СКН-40, образуют прочные хемосорбционные связи, которые обеспечивают стабилизирующий эффект при термической деструкции и повышают термостойкость эластомера.

Наполнение эластомера Ф-40 наночастицами меди и алюминия повышает модуль упругости, прочность и долговечность выносливость материала.

Ввод металлических наночастиц в полимерную матрицу, приводит к образованию сетчатых образований с наночастицами в полимерных цепях. При этом молекулярная подвижность цепей снижается, а термостойкость нанокompозита увеличивается. Медь и алюминий обладают наиболее высокой теплопроводностью. Поэтому наполнение эластомера Ф-40 наночастицами меди и алюминия повысит термостойкость и теплопроводность нанокompозита.

2. Установлен оптимальный состав нанокompозита, при котором материал имеет наиболее высокие механические свойства: эластомер Ф-40 – 100 масс.ч., алюминиевый нанопорошок – 2,0 масс. ч. и медный нанопорошок – 1,6 масс. ч. Нанокompозит имеет высокую удельную работу разрушения $12,9 \text{ МДж/м}^3$. В сравнении с не наполненным эластомером модуль упругости нанокompозита увеличился до 1,65 раза, а адгезия – 2,9 раза.

3. Термостойкость нанокompозита повысилась, в сравнении с не наполненным эластомером, в 1,23 раза и составила 123 °С.

Наполнение наночастицами алюминия и меди увеличивает коэффициент теплопроводности нанокompозита до $\lambda_k = 21,8 \text{ Вт/м К.}$, что в 38,9 раза превышает коэффициент теплопроводности эластомера Ф-40. Коэффициенты старения нанокompозита по прочности в 1,8 раза, а по деформации в 1,4 раза больше аналогичных показателей полимерной матрицы, что является подтверждением увеличения термостойкости нанокompозита.

4. Новым эластомерным нанокompозитом рекомендуется восстанавливать корпусные детали автотракторной техники с диаметральной износом посадочных отверстий под подшипники до 0,25 мм. Наполнение эластомера Ф-40 нанопорошками алюминия и меди повышает теплопроводность материала и значительно увеличивает теплоотвод от деталей восстановленного подшипникового узла. Температура деталей подшипникового узла, с посадкой, восстановленной нанокompозитом эластомера Ф-40, ниже до 16 °С в сравнении с ненаполненным материалом.

Список литературы

1. Бобович Б.Б. Утилизация автомобилей и автокомпонентов: учеб. пособие. – М.: Форум. – 2011. – 167 с.
2. Черноиванов В.И. Голубев И.Г. Восстановление деталей машин (Состояние и перспективы). – М.: ФГНУ «Росинформагротех». – 2010. – 376 с.
3. Ли Р.И. Технологии восстановления и упрочнения деталей автотракторной техники: учеб. пособие. – Липецк: Изд-во ЛГТУ. – 2014. – 379 с.
4. Коломейченко А.В., Кравченко И.Н., Пузряков А.Ф., Логачёв В.Н., Титов Н.В. Технология восстановления с упрочнением деталей машин на основе применения микродугового оксидирования // Строительные и дорожные машины. – 2014. – № 10. – С. 16 – 21.
5. Кононенко А.С., Кузнецов И.А. Восстановление посадочных мест под подшипники качения в корпусных деталях машин полимерными нанокompозитами // Труды ГОСНИТИ. – 2016. – Т. 124 (2). – С. 81 – 85.

6. Жачкин С.Ю., Краснова М.Н., Пеньков Н.А., Краснов А.И. Моделирование механического воздействия инструмента при получении гальванических композитных покрытий // Труды ГОСНИТИ. – 2015. – Т. 120. – С. 130 – 134.
7. Кононенко А.С., Соловьева А.А. Повышение прочностных характеристик анаэробных полимерных составов, используемых при восстановлении посадок подшипников качения // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2019. – № 2. – С. 35 – 38.
8. Надежность и ремонт машин / под ред. В.В. Курчаткина. – М.: Колос. – 2000. – 776 с.
9. Курчаткин В.В. Восстановление посадок подшипников качения сельскохозяйственной техники полимерными материалами: дисс. ... д-ра техн. наук. 05.20.03 – Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – Москва. – 1989. – 407 с.
10. Ли Р.И. Условия формирования равномерного полимерного покрытия на наружной поверхности вращающейся цилиндрической детали // Клеи. Герметики. Технологии – 2015. – № 4. – С. 33 – 38.
11. Ли Р.И., Псарев Д.Н. Модель формирования равномерного полимерного покрытия на наружной поверхности вращающейся цилиндрической детали // Клеи. Герметики. Технологии – 2015. – № 2. – С. 34 – 38.
12. Машин Д.В. Повышение эффективности восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях сельскохозяйственной техники композицией на основе эластомера Ф – 40С: дис. ... канд. техн. наук. 05.20.03 – Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – Мичуринск. – 2013. – 149 с.
13. Бочаров А.В. Повышение эффективности восстановления неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники адгезивами, наполненными дисперсными металлическими порошками: дис. ... канд. техн. наук. . 05.20.03 – Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – Мичуринск. – 2009. – 150 с.
14. Ли Р.И., Псарев Д.Н., Мироненко А.В., Кибя М.Р. Перспективный полимерный материал для восстановления корпусных деталей машин // Клеи. Герметики, Технологии. – 2017. – № 5. – С. 34 – 37.
15. Колесников А.А. Повышение качества восстановления корпусных деталей автомобилей полимерными композиционными материалами после ультразвуковой обработки: дисс. ... канд. техн. наук: 05.22.10 – Эксплуатация автомобильного транспорта. – Орел. – 2017. – 179 с.
16. Ли Р.И. Полимерные композиционные материалы для фиксации подшипников качения в узлах машин: Монография. – Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета. – 2017. – 224 с.
17. Ли Р.И., Машин Д.В. Теоретические аспекты повышения эффективности восстановления корпусных деталей сельскохозяйственной техники композициями на основе эластомеров // Вестник МичГАУ. – 2013. – № 1. – С. 53 – 55.
18. Малогиин В.А. Восстановление посадок подшипников качения автомобилей нанокompозитом на основе анаэробного герметика АН-111: дис. ... канд. техн. наук. 05.20.03 – Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – Мичуринск. – 2019. – 169 с.
19. Михайлюк А.Е. Разработка эластомерных материалов на основе этиленпропиленовых каучуков, модифицированных высокодисперсными частицами металлов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 02.00.06 – Высокомолекулярные соединения. – Волгоград. – 2014. – 140 с.
20. Помогайло А.Д., Розенберг А.С., Уфлянд И.Е. Наночастицы металлов в полимерах. – Москва: Химия. – 2000. – 672 с.
21. Кособудский И.Д. Наноразмерные металлические частицы в полимерных матрицах: I. Синтез, механизмы образования и стабилизации // Известия высших учебных заведений. – 2000. – Т. 43 (4). – С. 3 – 18.
22. Пиотровский К.Б., Тарасова З.Н. Старение и стабилизация синтетических каучуков и вулканизатов. – Москва: Химия. – 1980. – 264 с.
23. Львов Ю.А., Пиотровский К.Б., Авдеевич Т.А. Влияние металлов переменной валентности на стабильность бутадиен-нитрильного каучука в условиях термоокисления // Каучук и резина. – 1972. – № 9. – С. 18 – 22.
24. Li R.I., Psarev D.N., Kiba M.R. Teoretical Concerns in Selection of Metall Nanosized Fillers for the F-40 Elastomer Composition // Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials. – 2019. – Vol. 12. – No. 1. – Pp. 15 – 19.
25. Козлов Г.В. Структура и свойства дисперсно-наполненных полимерных нанокомпозитов // Успехи физических наук. – 2015 – т. 185. – № 1. – С. 35 – 64.
26. Halpin J. J. Appl. Phys. – 1964. – v. 35. – P. 3133 – 3142.

27. Воюцкий С.С., Раевский В.Г., Ягнатинская С.М. Успехи коллоидной химии. – М.: Наука. – 1977. – С. 330 – 347.
28. Липатов Ю.С. Физическая химия наполненных полимеров. – М.: Химия. – 1977. – 304 с.
29. Li R.I., Psarev D.N., Kiba M.R.. Promising Nanocomposite Based on Elastomer F-40 for Repairing Base Members of Machines. // Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials. – 2019. – Vol. 12. – No. 2. – Pp. 128 – 132.
30. Наполнители для полимерных композиционных материалов. / Под ред. Г.С. Каца и Д.В. Милевски. Пер. с англ. / Под ред. П. Г. Бабаевского. – М.: Химия. – 1981. – 736 с.
31. Киба М.Р. Восстановление посадочных отверстий в корпусных деталях сельскохозяйственной техники наноккомпозитом на основе эластомера Ф-40: дис. ... канд. техн. наук. 05.20.03 – Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве. – Мичуринск. – 2020. – 164 с.
32. Ли Р.И. Основы научных исследований. – Липецк: Изд-во ЛГТУ. – 2013. – 190 с.

References

1. Bobovich B.B. Utilizacija avtomobilej i avtokomponentov: ucheb. posobie. – М.: Forum. – 2011. – 167 s.
2. Chernovanov V.I. Golubev I.G. Vosstanovlenie detalej mashin (Sostojanie i perspektivy). – М.: FGNU «Rosinformagroteh». – 2010. – 376 s.
3. Li R.I. Tehnologii vosstanovlenija i uprochnenija detalej avtotraktornoj tehniki: ucheb. posobie. – Lipeck: Izd-vo LGTU. – 2014. – 379 s.
4. Kolomejchenko A.V., Kravchenko I.N., Puzrjakov A.F., Logachjov V.N., Titov N.V. Tehnologija vosstanovlenija s uprochneniem detalej mashin na osnove primenenija mikrodrugovogo oksidirovanija // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. – 2014. – № 10. – S. 16 – 21.
5. Kononenko A.S., Kuznecov I.A. Vosstanovlenie posadochnyh mest pod podshipniki kachenija v korpusnyh detaljah mashin polimernymi nanokompozitami // Trudy GOSNITI. – 2016. – T. 124 (2). – S. 81 – 85.
6. Zhachkin S.Ju., Krasnova M.N., Pen'kov N.A., Krasnov A.I. Modelirovanie mehanicheskogo vozdejstviya instrumenta pri poluchenii gal'vanicheskikh kompozitnyh pokrytij // Trudy GOSNITI. – 2015. – T. 120. – S. 130 – 134.
7. Kononenko A.S., Solov'eva A.A. Povyshenie prochnostnyh harakteristik anajerobnyh polimernyh sostavov, ispol'zuemyh pri vosstanovlenii posadok podshipnikov kachenija // Remont. Vosstanovlenie. Modernizacija. – 2019. – № 2. – S. 35 – 38.
8. Nadezhnost' i remont mashin / pod red. V.V. Kurchatkina. – М.: Kolos. – 2000. – 776 s.
9. Kurchatkin V.V. Vosstanovlenie posadok podshipnikov kachenija sel'skhozajstvennoj tehniki polimernymi materialami: diss. ... d-ra tehn. nauk. 05.20.03 – Tehnologii i sredstva tehničeskogo obsluzhivaniya v sel'skom hozjajstve. – Moskva. – 1989. – 407 s.
10. Li R.I. Uslovija formirovanija ravnomernogo polimernogo pokrytija na naruzhnoj poverhnosti vrashhajushhejsja cilindricheskoj detali // Klei. Germetiki. Tehnologii – 2015. – № 4. – S. 33 – 38.
11. Li R.I., Psarev D.N. Model' formirovanija ravnomernogo polimernogo pokrytija na naruzhnoj poverhnosti vrashhajushhejsja cilindricheskoj detali // Klei. Germetiki. Tehnologii – 2015. – № 2. – S. 34 – 38.
12. Mashin D.V. Povyshenie jeffektivnosti vosstanovlenija posadochnyh otverstij v korpusnyh detaljah sel'skhozajstvennoj tehniki kompoziciej na osnove jelastomera F – 40S: dis. ... kand. tehn. nauk. 05.20.03 – Tehnologii i sredstva tehničeskogo obsluzhivaniya v sel'skom hozjajstve. – Michurinsk. – 2013. – 149 s.
13. Bocharov A.V. Povyshenie jeffektivnosti vosstanovlenija nepodvizhnyh soedinenij podshipnikov kachenija sel'skhozajstvennoj tehniki adgezivami, napolnennymi dispersnymi metallicheskim poroshkami: dis. ... kand. tehn. nauk. . 05.20.03 – Tehnologii i sredstva tehničeskogo obsluzhivaniya v sel'skom hozjajstve. – Michurinsk. – 2009. – 150 s.
14. Li R.I., Psarev D.N., Mironenko A.V., Kiba M.R. Perspektivnyj polimernyj material dlja vosstanovlenija korpusnyh detalej mashin // Klei. Germetiki, Tehnologii. – 2017. – № 5. – S. 34 – 37.
15. Kolesnikov A.A. Povyshenie kachestva vosstanovlenija korpusnyh detalej avtomobilej polimernymi kompozicionnymi materialami posle ul'trazvukovoj obrabotki: diss. ... kand. tehn. nauk: 05.22.10 – Jekspluatacija avtomobil'nogo transporta. – Orel. – 2017. – 179 s.
16. Li R.I. Polimernye kompozicionnye materialy dlja fiksacii podshipnikov kachenija v uzlah mashin: Monografija. – Lipeck: Izd-vo Lipeckogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – 2017. – 224 s.
17. Li R.I., Mashin D.V. Teoreticheskie aspekty povyshenija jeffektivnosti vosstanovlenija korpusnyh detalej sel'skhozajstvennoj tehniki kompozicijami na osnove jelastomeroev // Vestnik MichGAU. – 2013. – № 1. – S. 53 – 55.

18. Maljugin V.A. Vosstanovlenie posadok podshipnikov kachenija avtomobilej nanokompozitom na osnove anajerobnogo germetika AN-111: dis. ... kand. tehn. nauk. 05.20.03 – Tehnologii i sredstva tehničeskogo obslužhivanija v sel'skom hozjajstve. – Michurinsk. – 2019. – 169 s.
19. Mihajljuk A.E. Razrabotka jelastomernyh materialov na osnove jetilenpropilenovyh kauchukov, modifitsirovannyh vysokodispersnymi chasticami metallov [Tekst]: dis. ... kand. tehn. nauk: 02.00.06 – Vysokomolekuljarnye soedinenija. – Volgograd. – 2014. – 140 s.
20. Pomogajlo A.D., Rozenberg A.S., Ufljand I.E. Nanochasticy metallov v polimerah. – Moskva: Himija. – 2000. – 672 s.
21. Kosobudskij I.D. Nanorazmernye metallicheskie chasticy v polimernyh matricah: I. Sintez, mehanizmy obrazovaniya i stabilizacii // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. – 2000. – T. 43 (4). – S. 3 – 18.
22. Piotrovskij K.B., Tarasova Z.N. Starenie i stabilizacija sinteticheskikh kauchukov i vulkanizatorov. – Moskva: Himija. – 1980. – 264 s.
23. L'vov Ju.A., Piotrovskij K.B., Avdeevich T.A. Vlijanie metallov peremennoj valentnosti na stabil'nost' butadien-nitril'nogo kauchuka v uslovijah termookislenija // Kauchuk i rezina. – 1972. – № 9. – S. 18 – 22.
24. Li R.I., Psarev D.N., Kiba M.R. Teoretical Concerns in Selection of Metall Nanosized Fillers for the F-40 Elastomer Composition // Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials. – 2019. – Vol. 12. – No. 1. – Rp. 15 – 19.
25. Kozlov G.V. Struktura i svojstva dispersno-napolnennyh polimernyh nanokompozitov // Uspehi fizicheskikh nauk. – 2015 – t. 185. – № 1. – S. 35 – 64.
26. Halpin J. J. Appl. Phys. – 1964. – v. 35. – R. 3133 – 3142.
27. Vojuckij S.S., Raevskij V.G., Jagnatinskaja S.M. Uspehi kolloidnoj himii. – M.: Nauka. – 1977. – S. 330 – 347.
28. Lipatov Ju.S. Fizicheskaja himija napolnennyh polimerov. – M.: Himija. – 1977. – 304 s.
29. Li R.I., Psarev D.N., Kiba M.R.. Promising Nanocomposite Based on Elastomer F-40 for Repairing Base Members of Machines. // Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials. – 2019. – Vol. 12. – No. 2. – Rp. 128 – 132.
30. Napolniteli dlja polimernyh kompozicionnyh materialov. / Pod red. G.S. Kaca i D.V. Milevski. Per. s angl. / Pod red. P. G. Babaevskogo. – M.: Himija. – 1981. – 736 s.
31. Kiba M.R. Vosstanovlenie posadochnyh otverstij v korpusnyh detaljah sel'skohozjajstvennoj tehniki nanokompozitom na osnove jelastomera F-40: dis. ... kand. tehn. nauk. 05.20.03 – Tehnologii i sredstva tehničeskogo obslužhivanija v sel'skom hozjajstve. – Michurinsk. – 2020. – 164 s.
32. Li R.I. Osnovy nauchnyh issledovanij. – Lipeck: Izd-vo LGTU. – 2013. – 190 s.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Ли Роман Иннакентьевич – доктор технических наук, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Липецкий государственный технический университет», Россия, г. Липецк, e-mail: romanlee@list.ru.

Псарев Дмитрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Мичуринский государственный аграрный университет», Россия, г. Мичуринск, e-mail: psarev_380@mail.ru.

Кибa Мария Романовна – старший преподаватель Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Россия, г. Санкт-Петербург, e-mail: damsel_91@mail.ru.

Author credentials

Affiliations

Li Roman – Full Doctor of Technical Sciences, Professor of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Lipetsk State Technical University”, e-mail: romanlee@list.ru.

Psarev Dmitry – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “Michurinsk state agrarian University”, Russia, Michurinsk, e-mail: psarev_380@mail.ru.

Kiba Maria – senior lecturer of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education “St. Petersburg State University of Architecture and Construction”, Russia, St. Petersburg, e-mail: loseroff@mail.ru.

Поступила в редакцию (Received): 26.12.2020 Принята к публикации (Accepted): 29.01.2021