

Модификация минерального наполнителя органосиланами в полимерной композиции для дорожной разметки

Виктор В. Талалай	¹	talalay@bk.ru	 0000-0002-8322-9147
Наталья В. Борисова	²	bnvkt2020@ya.ru	 0000-0001-8827-9381
Александр А. Артеменко	²	artemenko_58@mail.ru	 0000-0002-9443-4154
Юрий Э. Васильев	¹	89037500377@ya.ru	 0000-0002-8506-5027

¹ Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, пр-т Ленинградский, 64, г. Москва, 125319, Россия

² Энгельский технологический институт (филиал) Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., пл. Свободы, 17, г. Энгельс, Саратовской обл., 413111, Россия

Аннотация. В настоящее время перспективно применение полимерных композиционных материалов для дорожной разметки, в частности термопластов на основе нефтеполимерных смол. Эффективность применения таких дорожно-разметочных материалов и срок их службы, в основном, зависят от рецептур термопластичных композиций для разметки и технологий их получения. Целью данной работы являлась оценка адгезионного взаимодействия, модифицированного органосиланами микродоломита и термопластичной нефтеполимерной смолы для придания повышенных эксплуатационных свойств дорожной разметочной композиции. Для повышения адгезионного сродства в системе полимер:наполнитель предложено провести модификацию микродоломита органосилоном марки АГМ-9, который содержит в составе бифункциональной молекулы гидролизуюмую кремний-функциональную группу и негидролизуюмую органofункциональную группу, что обеспечивает придание неорганической поверхности наполнителя органofункциональных свойств. Для создания разметочных термопластов с длительным сроком эксплуатации в данной работе было предложено использовать комбинированное сочетание модифицированного и немодифицированного микродоломита. Установлено, что сочетание модифицированного и немодифицированного микродоломита в пределах 10–15:85–90 приводит к увеличению прочности до 7 МПа, что выше допустимого значения не менее 5 МПа, при этом сохраняется способность к деформации растяжения и относительное удлинение при разрыве снижается от 5 до 3 %, что также выше допустимого не менее 3 %. Разработанный композиционный разметочный материал на основе отечественной нефтеполимерной смолы и комбинированного наполнителя марки МД40 с сочетанием модифицированного и немодифицированного микродоломита в соотношении 12,5:87,5 обладает оптимальными характеристиками «прочность–эластичность», соответствующими требованиям, предъявляемым к материалам дорожной разметки и длительной устойчивостью к истиранию до 4–х тысяч циклов.

Ключевые слова: дорожная разметка, нефтеполимерная смола, модифицированный микродоломит, органосиланы, адгезия, долговечность, эксплуатационные характеристики.

Modification of mineral filler with organosilanes in a polymer composition for road marking

Victor V. Talalai	¹	talalay@bk.ru	 0000-0002-8322-9147
Natalia V. Borisova	²	bnvkt2020@ya.ru	 0000-0001-8827-9381
Alexander A. Artemenko	²	artemenko_58@mail.ru	 0000-0002-9443-4154
Yuri E. Vasiliev	¹	89037500377@ya.ru	 0000-0002-8506-5027

¹ Moscow Automobile and Road State Technical University, 64 Leningradsky Ave., Moscow, 125319, Russia

² Engels Technological Institute of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Svobody Square, 17, Engels, Saratov region, 413111, Russia

Abstract. Currently, the use of polymer composite materials for road markings, in particular thermoplastics based on petroleum polymer resins, is promising. The effectiveness of the use of such road marking materials and their service life mainly depend on the formulations of thermoplastic compositions for marking and technologies for their production. The purpose of this work was to evaluate the adhesive interaction of microdolomite modified by organosilanes and thermoplastic petroleum polymer resin to impart increased operational properties of the road marking composition. To increase the adhesive affinity in the polymer system:filler it is proposed to modify the microdolomite with organosilane of the AGM-9 brand, which contains a hydrolyzable silicon-functional group and a non-hydrolyzable organofunctional group in the composition of the bifunctional molecule, which provides organofunctional properties to the inorganic surface of the filler. To create marking thermoplastics with a long service life in this work, it was proposed to use a combined combination of modified and unmodified microdolomite. It was discovered that the mixture of modified and unmodified microdolomite in the range of 10-15:85-90 leads to an increase in strength up to 7 MPa, which is higher than the permissible value of at least 5 MPa, while the ability to strain stretching and elongation at break decreases from 5 to 3%, which is also higher than the permissible value of at least 3%. The developed composite marking material based on domestic petroleum polymer resin and a combined filler of the MD40 brand with a combination of modified and unmodified microdolomite in a ratio of 12.5:87.5 has optimal strength-elasticity characteristics that meet the requirements for road marking materials and long-term abrasion resistance of up to 4 thousand cycles.

Keywords: road markings, petroleum polymer resin, modified microdolomite, organosilanes, adhesion, durability, performance characteristics.

Для цитирования

Талалай В.В., Борисова Н.В., Артеменко А.А., Васильев Ю.Э. Модификация минерального наполнителя органосиланами в полимерной композиции для дорожной разметки // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 84. № 2. С. 269–275. doi:10.20914/2310-1202-2022-2-269-275

For citation

Talalai V.V., Borisova N.V., Artemenko A.A., Vasiliev Yu.E. Modification of mineral filler with organosilanes in a polymer composition for road marking. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2022. vol. 84. no. 2. pp. 269–275. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2022-2-269-275

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

В настоящее время полимерные композиционные материалы находят практическое применение во всех отраслях народного хозяйства. Такая популярность ПКМ обусловлена не только уникальным комплексом свойств, но и возможностью его направленного регулирования, которое может быть решено путем модификации как наполнителя, так и матрицы [1–4].

Применение полимерных композиционных материалов для дорожной разметки уже давно освоенное в Европе, а в последнее время добралось и до России. Использование для этих целей композиционных материалов на основе термопластов обеспечивает повышение срока службы дорожной разметки в 5–10 раз в сравнении с традиционными лакокрасочными покрытиями [5–12].

Эффективность применения дорожно-разметочных материалов и срок их службы, в основном, зависят от рецептур термопластичных композиций для разметки и технологий их получения [11–15].

Цель работы – оценка адгезионного взаимодействия, модифицированного органосиланами микродоломита и термопластичной нефтеполимерной смолы для придания повышенных эксплуатационных свойств дорожной разметочной композиции.

Материалы и методы

Объектами исследования служили модельные композиции на основе нефтеполимерных смол (НПС) разных марок и производителей: НПС-1 марки UCRP1004L производитель Китай; НПС-2 марки C5100 производитель Россия; НПС-3 марки UCRP100L производитель Корея. Кроме связующего в состав композиции включали наполнитель немодифицированный и модифицированный органосиланами марки АГМ-9 в различном соотношении, а также функциональные добавки (таблица 1).

Деформационно-прочностные свойства полимерных композиционных разметочных материалов испытывали согласно стандартизованных методик [16–19].

Долговечность исследуемых разметочных композиций изучали на полигоне, предназначенном для испытания дорожных материалов на многократное воздействие колеса, называемый «Карусель-2». Параметры испытания: скорость вращения колеса 90 км/ч, количество циклов – 1–4 тыс. [16–20].

Результаты

Ранее в работах [16–18] было установлено, что введение в композицию, предназначенную для дорожной разметки, дисперсного минерального наполнителя – микродоломита марки

МД 40 в количестве 60% масс. ч. является перспективным, так как именно при такой степени наполнения достигаются максимальные значения прочности при межслоевом сдвиге.

В данной работе изучена возможность модификации микродоломита (МД), применяемого в качестве наполнителя в разметочной композиции на основе нефтеполимерных смол. Для повышения адгезионного сродства в системе полимер: наполнитель, предложено провести модификация МД органосилоном марки АГМ-9, который содержит в составе бифункциональной молекулы гидролизуемую кремний-функциональную группу и негидролизуемую органофункциональную группу, что обеспечивает придание неорганической поверхности наполнителя органофункциональных свойств (рисунок 1).

Как видно из приведенных данных, после обработки силаном на результирующем ИК-спектре (кривая МД + АГМ-9) появляются пики, соответствующие валентным колебаниям силоксановой связи Si-O-Si (1103 см^{-1}) и групп алифатического эфира C-O-C и исчезают пики, характерные для колебаний гидроксильных OH-групп (1452 см^{-1}), что позволяет предположить адсорбционное взаимодействие микродоломита с органосилоном.

Предполагаемая схема физико-химического взаимодействия наполнителя с модификатором представлена на рисунке 2.

В результате при введении модифицированного наполнителя (МД + АГМ-9) в состав нефтеполимерного связующего в композиции появляются NH_2 -группы и создаются условия для взаимодействия модифицированного МД с макромолекулами НПС (рисунок 3).

Подтверждением предполагаемого на основе данных ИК-спектроскопии взаимодействия в системе нефтеполимерная смола и модифицированный органосилоном микродоломит является изменение деформационно-прочностных свойств получаемого композита (рисунок 4).

В результате модификации наполнителя органосиланами формируется термопластичный композиционный материал, для которого характерно повышение прочности при межслоевом сдвиге до 7–8 МПа при снижении относительного удлинения при деформации растяжения до 5–10%, что не соответствует эксплуатационным требованиям.

В связи с этим для создания разметочных термопластов с длительным сроком эксплуатации в данной работе было предложено использовать комбинированное сочетание модифицированного и немодифицированного микродоломита. Содержание $\text{МД}_{\text{модиф}}$ в комбинированном наполнителе для дорожных разметочных композиций варьировали от 0 до 25% (рисунок 5). Установлено,

что сочетание модифицированного и немодифицированного микродоломита в пределах 10–15:85–90 приводит к увеличению прочности до 7 МПа, что выше допустимого значения не менее 5 МПа, при этом сохраняется способность к деформации растяжения (относительное удлинение должно быть не менее 3%) [16–18]. Оценку устойчивости исследуемых композиций дорожного разметочного материала к истиранию автомобильными шинами с разными видами протекторов, в том числе шипованными проводили по внешнему виду. Установлено, что после 1000 циклов наблюдали снижение скорости износа для составов № 1 и № 2. Дальнейшее увеличение износа

до 4000 циклов с сохранением внешнего вида выдержала разметочная композиция составом № 2.

Разработанный многокомпонентный полимерный материал на основе термопласта для дорожной разметки составом № 2 на основе НПС отечественного производителя и комбинированного наполнителя с сочетанием модифицированного и немодифицированного микродоломита в соотношении 12,5:87,5 отличается долговечностью и повышенными эксплуатационными характеристиками, отвечающие требованиям, предъявляемым к дорожно-разметочным материалам [16–20].

Таблица 1.

Модельный состав разметочной композиции на основе нефтеполимерных смол и микродоломита

Table 1.

Model composition of the marking composition based on petroleum polymer resins and micro-dolomite

Компонент Component	Содержание компонента, % _{масс} Component content, % by weight		
	состав 1 composition 1	состав 2 composition 2	состав 3 composition 3
Связующее – нефтеполимерная смола Binder – petroleum polymer resin	НПС-1 NPC-1 20,0	НПС-2 NPC-2 20,0	НПС-3 NPC-3 20,0
Наполнитель – микродоломит марки МД40 Filler – microdolomite of the MD40 brand	60,0	60,0	60,0
МД _{модиф} : МД _{немодиф} MD _{modif} : MD _{unmodif}	10:90	12,5:87,5	15:85
Пластификатор – масло промышленное Plasticizer – industrial oil	4,0	4,0	4,0
Адгезив – этиленвинилацетат Adhesive – ethylene vinyl acetate	2,0	2,0	2,0
Адгезив – термопластичный эластомер «стирол-изопрен-стирол» Adhesive – thermoplastic elastomer "styrene-isoprene-styrene"	2,0	2,0	2,0
Добавка контроля пенообразования и липкости – воск марки ПВ-200 Foaming control additive and stickiness – PV-200 brand wax	2,0	2,0	2,0
Пигмент – диоксид титана Pigment – titanium dioxide	5	5	5
Светоотражающая добавка – стекломикрочастицы Reflective additive – glass microbeads	5	5	5

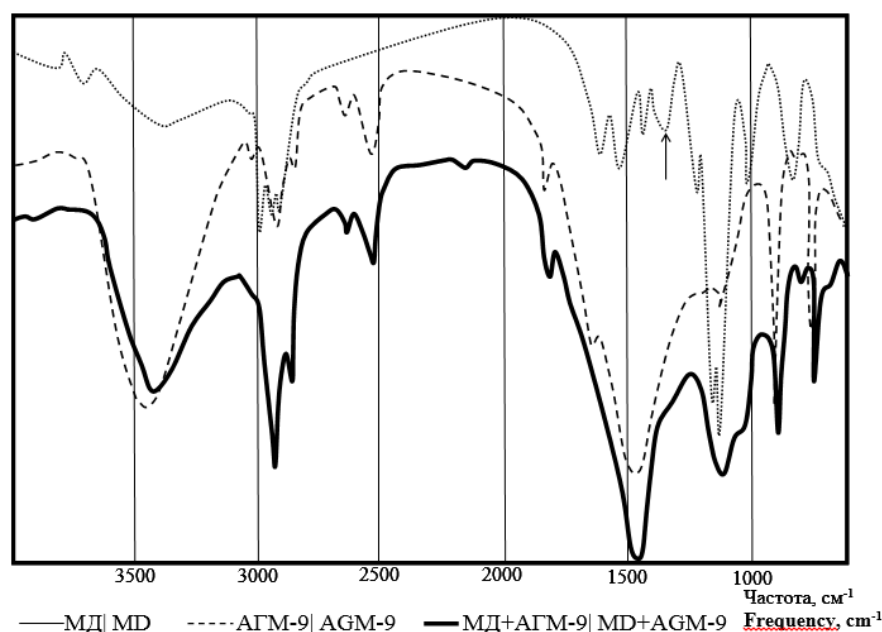


Рисунок 1. Спектрограмма поверхности модифицированного силаном наполнителя

Figure 1. Spectrogram of the silane modified filler surface

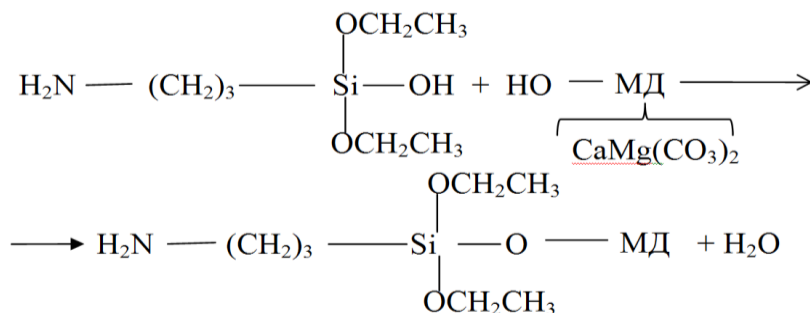


Рисунок 2. Схема взаимодействия органосилана с наполнителем

Figure 2. Scheme of interaction of organosilane with filler

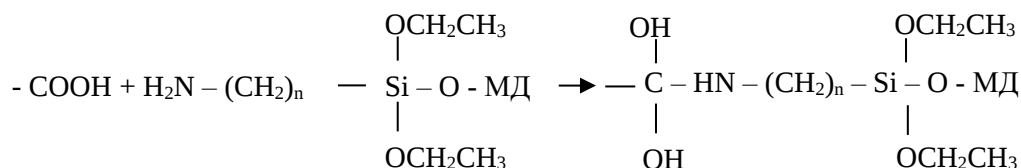


Рисунок 3. Схема взаимодействия аппретирующего наполнителя с нефтеполимерной смолой

Figure 3. Scheme of interaction of the approved filler with an oil polymer resin

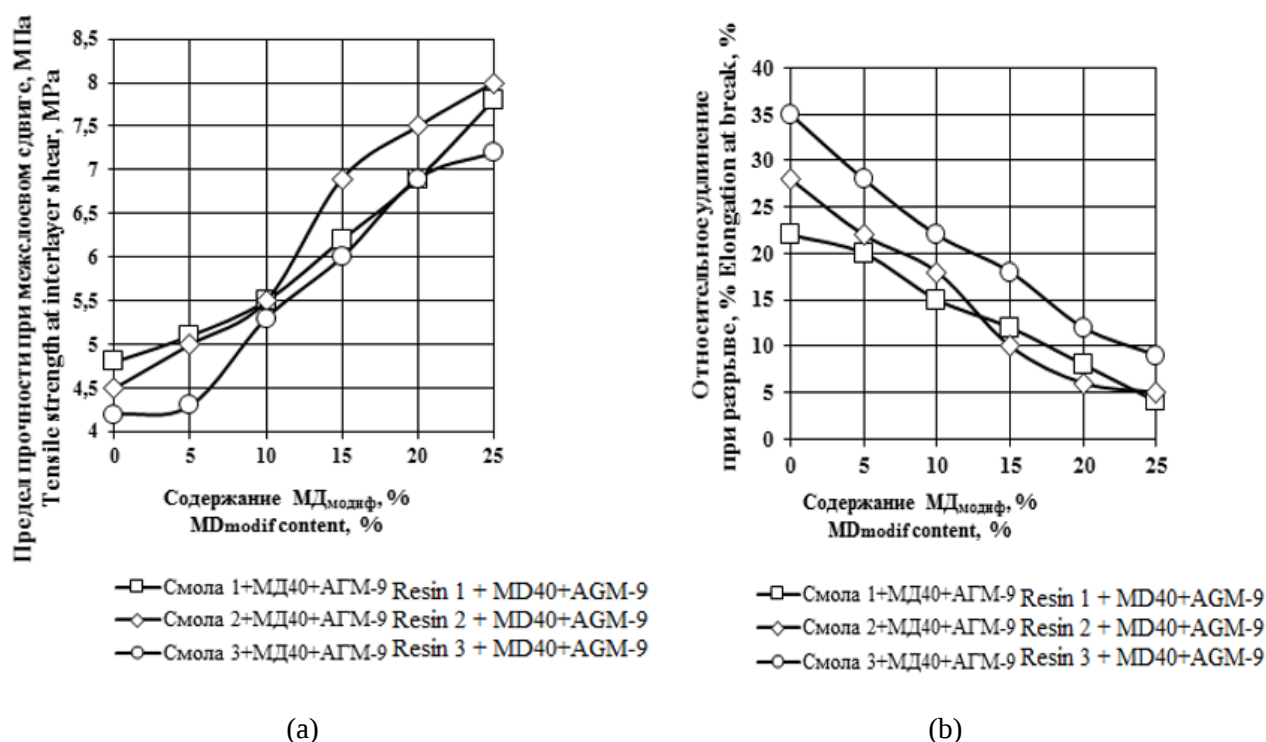


Рисунок 4. Зависимость деформационно-прочностных свойств: (а) – прочность при сдвиге; (б) – относительное удлинение от содержания модифицированного микродоломита и нефтеполимерной смолы разных марок

Figure 4. Dependence of deformation and strength properties: (a) – shear strength; (b) – elongation from the content of modified microdolomite and petroleum polymer resin of different brands

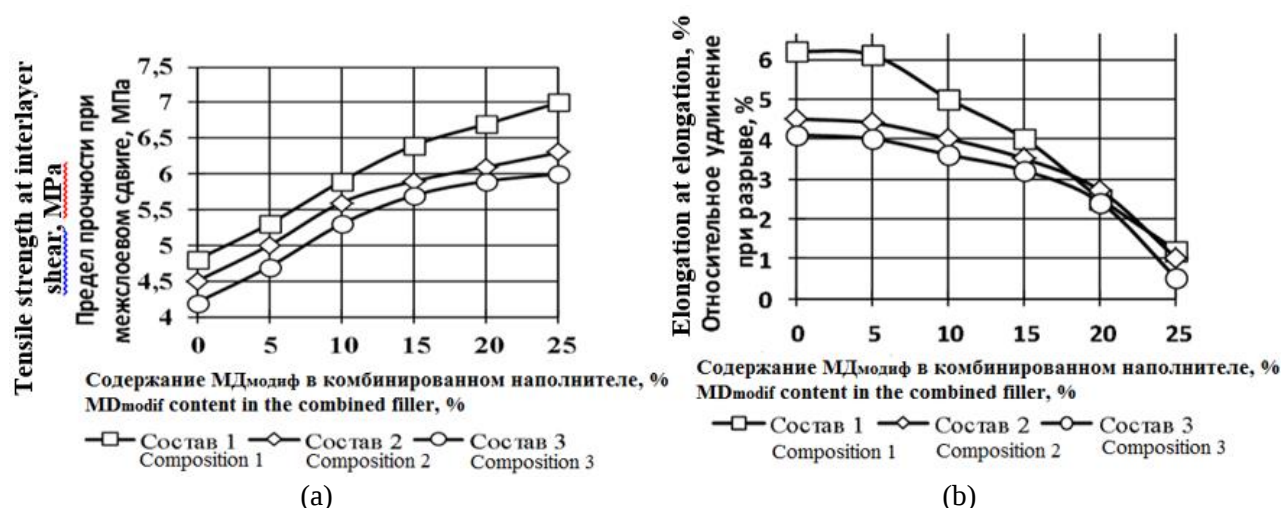


Рисунок 5. Зависимость деформационно-прочностных свойств: а – прочность при межслоевом сдвиге; б – относительное удлинение с комбинированным сочетанием модифицированного и немодифицированного микродоломита

Figure 5. Dependence of deformation and strength properties: a – strength at shear stress; b – elongation with a combined combination of modified and unmodified microdolomite

Закключение

Разработанный композиционный разметочный материал на основе отечественной нефтеполимерной смолы и комбинированного наполнителя марки МД40 с сочетанием модифицированного и немодифицированного микродоломита

в соотношении 12,5:87,5 обладает оптимальными характеристиками «прочность–эластичность», соответствующими требованиям, предъявляемым к материалам дорожной разметки и длительной устойчивостью к истиранию до 4000 циклов.

Литература

- 1 Yakovlev N.A., Yakovlev N., Gorshkov N.V., Yuditseva T. et al. Enhancement of mechanical and electrical properties of epoxy based composites filled with intact or oxidized carbon nanotubes // *Composites: Mechanics, Computations, Applications*. 2019. V. 10. № 3. P. 241–251. doi: 10.1615/CompMechComputApplIntJ.2018027488
- 2 Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. С. 344–348.
- 3 Baillie C., Jayasinghe R. *Green Composites: Waste and Nature-based Materials for a Sustainable Future*. Woodhead Publishing, 2017. 220 p.
- 4 Ткачук А.И., Гребенева Т.А., Чурсова Л.В., Панина Н.Н. Термопластичные связующие. Настоящее и будущее // *Труды ВИАМ*. 2013. № 11. С. 7.
- 5 Свежинский В.Н. Дорожная разметка – некоторые итоги 2015 // *Автомобильные дороги*. 2016. № 4. С. 50–53.
- 6 Свежинский В.Н., Калядин Э.Н. Дорожная разметка 2017. Проблемы, тенденции, события // *Про Движение*. 2017. № 3 (10). С. 28–33.
- 7 Soilán M., Riveiro B., Martínez-Sánchez J., Arias P. Segmentation and classification of road markings using MLS data // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2017. V. 123. P. 94–103. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2016.11.011
- 8 Wei C., Li S., Wu K., Zhang Z. et al. Damage inspection for road markings based on images with hierarchical semantic segmentation strategy and dynamic homography estimation // *Automation in Construction*. 2021. V. 131. P. 103876. doi: 10.1016/j.autcon.2021.103876
- 9 Vasiliev Y., Talalay V., Kochetkov A., Surnina E. et al. Structural features of thermoplastic marking material with dispersed filler // *Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport*. 2019. P. 698–707. doi: 10.1007/978-3-030-57453-6_66
- 10 Burghardt T.E. and Pashkevich A. Green Public Procurement criteria for road marking materials from insiders' perspective // *Journal of Cleaner Production*. 2021. P.126521. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126521
- 11 Dormidontova T.V., Filatova A.V. Research of influence of quality of materials on a road marking of highways // *Procedia Engineering*. 2016. V. 153. P. 933–937. doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.256
- 12 Caves-Campos A., Banón L., Covers-Garcia J.A., Ivory S. In situ study of road marking durability using glass microbeads and anti skid aggregates as drop-on materials // *Coatings*. 2018. V. 8. №. 10. P. 371. doi: 10.3390/coatings8100371
- 13 Bi Y., Pei J., Chen Z., Zhang L. et al. Preparation and characterization of luminescent road-marking paint // *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2021. V. 14. №. 2. P. 252–258. doi: 10.1007/s42947-020-0229-3
- 14 Burghardt T.E., Pashkevich A. Emissions of volatile organic compounds from road marking paints // *Atmospheric Environment*. 2018. V. 193. P. 153–157. doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.08.065

- 15 Юшков Б.С., Бургунутдинов А.М., Юшков В.С. Исследование долговечности дорожной горизонтальной разметки в климатических условиях Урала // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы I Междунар. науч. конф. Санкт-Петербург: Реноме, 2011. С. 208–212. URL: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/2/64/>
- 16 Талалай В.В., Талалай В.В., Котлярский Э.В., Васильев Ю.Э. О механизме взаимодействия микродоломитового наполнителя и нефтеполимерной смолы в материалах для дорожной разметки // Дороги и мосты. 2017. № 38. С. 340–359.
- 17 Возный С.И., Евтеева С.М., Талалай В.В., Кочетков А.В. Технология производства термопластиков для дорожной разметки // Пластические массы. 2014. № 9–10. С. 45–49.
- 18 Talalay V.V., Talalay V.V., Kochetkov A.V., Surnina E.K. et al. Structural Features of Thermoplastic Marking Material with Dispersed Filler // Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport. Springer, Cham, 2019. P. 698-707. doi: 10.1007/978-3-030-57453-6_66
- 19 ГОСТ Р ГОСТ Р 51256–2018. Технические средства организации дорожного движения. Разметка дорожная. Классификация. Технические требования. М.: Изд-во стандартов, 2018. 26 с.
- 20 Размарица Д.С. Световые характеристики дорожной разметки как один из методов нестандартных технических средств организации дорожного движения // Молодой ученый. 2016. № 13 (117). С. 202–204. URL: <https://moluch.ru/archive/117/32171/>

References

- 1 Yakovlev N.A., Yakovlev N., Gorshkov N.V., Yuditseva T. et al. Enhancement of mechanical and electrical properties of epoxy based composites filled with intact or oxidized carbon nanotubes. Composites: Mechanics, Computations, Applications. 2019. vol. 10. no. 3. pp. 241–251. doi: 10.1615/CompMechComputApplIntJ.2018027488
- 2 Raskutin A.E. Strategy for the development of polymer composite materials. Aviation materials and technologies. 2017. pp. 344–348. (in Russian).
- 3 Baillie C., Jayasinghe R. Green Composites: Waste and Nature-based Materials for a Sustainable Future. Woodhead Publishing, 2017. 220 p.
- 4 Tkachuk A.I., Grebeneva T.A., Chursova L.V., Panina N.N. thermoplastic binders. Present and future. Proceedings of VIAM. 2013. no. 11. pp. 7. (in Russian).
- 5 Svezhinsky V.N. Road markings - some results of 2015. Automobile roads. 2016. no. 4. pp. 50–53. (in Russian).
- 6 . Svezhinsky V.N., Kalyadin E.N. Road markings 2017. Problems, trends, events. Pro Movement. 2017. no. 3 (10). pp. 28–33. (in Russian).
- 7 Soilán M., Riveiro B., Martínez-Sánchez J., Arias P. Segmentation and classification of road markings using MLS data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2017. vol. 123. pp. 94-103. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2016.11.011
- 8 Wei C., Li S., Wu K., Zhang Z. et al. Damage inspection for road markings based on images with hierarchical semantic segmentation strategy and dynamic homography estimation. Automation in Construction. 2021. vol. 131. pp. 103876. doi: 10.1016/j.autcon.2021.103876
- 9 Vasiliev Y., Talalay V., Kochetkov A., Surnina E. et al. Structural features of thermoplastic marking material with dispersed filler. Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport. 2019. pp. 698-707. doi: 10.1007/978-3-030-57453-6_66
- 10 Burghardt T.E. and Pashkevich A. Green Public Procurement criteria for road marking materials from insiders' perspective. Journal of Cleaner Production. 2021. pp. 126521. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126521
- 11 Dormidontova T.V., Filatova A.V. Research of influence of quality of materials on a road marking of highways. Procedia Engineering. 2016. vol. 153. pp. 933–937. doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.256
- 12 Caves-Campos A., Banón L., Covers-Garcia J.A., Ivory S. In situ study of road marking durability using glass microbeads and anti skid aggregates as drop-on materials. Coatings. 2018. vol. 8. no. 10. pp. 371. doi: 10.3390/coatings8100371
- 13 Bi Y., Pei J., Chen Z., Zhang L. et al. Preparation and characterization of luminescent road-marking paint. International Journal of Pavement Research and Technology. 2021. vol. 14. no. 2. pp. 252-258. doi: 10.1007/s42947-020-0229-3
- 14 Burghardt T.E., Pashkevich A. Emissions of volatile organic compounds from road marking paints. Atmospheric Environment. 2018. vol. 193. pp. 153-157. doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.08.065
- 15 Yushkov B.S., Burgonutdinov A.M., Yushkov V.S. Investigation of the durability of road horizontal markings in the climatic conditions of the Urals. Technical sciences: problems and prospects: materials of the I Intern. scientific conf. St. Petersburg, Renome, 2011. pp. 208–212. Available at: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/2/64/> (in Russian).
- 16 Talalay V.V., Talalay V.V., Kotlyarsky E.V., Vasiliev Yu.E. On the mechanism of interaction of microdolomite filler and petroleum polymer resin in materials for road marking. Roads and bridges. 2017. no. 38. pp. 340–359. (in Russian).
- 17 Vozny S.I., Evteeva S.M., Talalay V.V., Kochetkov A.V. Technology for the production of thermoplastics for road marking. Plastic masses. 2014. no. 9–10. pp. 45–49. (in Russian).
- 18 Talalay V.V., Talalay V.V., Kochetkov A.V., Surnina E.K. et al. Structural Features of Thermoplastic Marking Material with Dispersed Filler. Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport. Springer, Cham, 2019. pp. 698-707. doi: 10.1007/978-3-030-57453-6_66
- 19 GOST R GOST R 51256–2018. Technical means of organizing traffic. Road marking. Classification. Technical requirements. Moscow, Publishing house of standards, 2018. 26 p. (in Russian).
- 20 Razmaritsa D.S. Light characteristics of road markings as one of the methods of non-standard technical means of organizing traffic. Young scientist. 2016. no. 13 (117). pp. 202–204. Available at: <https://moluch.ru/archive/117/32171/> (in Russian).

Сведения об авторах

Виктор В. Талалай аспирант, кафедра дорожно-строительных материалов, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, пр-т Ленинградский, 64, г. Москва, 125319, Россия, talalay@bk.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8322-9147>

Наталья В. Борисова к.т.н., доцент, кафедра технологий и оборудования химических, нефтегазовых и пищевых производств, Энгельсский технологический институт (филиал) Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., пл. Свободы, 17, г. Энгельс, 413111, Россия, bnvktn2020@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8827-9381>

Александр А. Артеменко д.т.н., профессор, кафедра оборудования и технологий обработки материалов, Энгельсский технологический институт (филиал) Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., пл. Свободы, 17, г. Энгельс, 413111, Россия, artemenko_58@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9443-4154>

Юрий Э. Васильев д.т.н., профессор, кафедра дорожно-строительных материалов, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, пр-т Ленинградский, 64, г. Москва, 125319, Россия, 89037500377@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8506-5027>

Вклад авторов

Виктор В. Талалай предложил методику проведения эксперимента

Наталья В. Борисова обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провела эксперимент, выполнила расчёты

Александр А. Артеменко консультация в ходе исследования

Юрий Э. Васильев написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несёт ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Victor V. Talalai graduate student, road building materials department, Moscow Automobile and Highway State Technical University, 64 Leningradsky Ave., Moscow, 125319, Russia, talalay@bk.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8322-9147>

Natalia V. Borisova Cand. Sci. (Engin.), associate professor, technologies and equipment for chemical, oil and gas and food industries department, Engels Institute of Technology (branch) Yu.A. Gagarin Saratov State Technical University, sq. Svobody, 17, Engels, 413111, Russia, bnvktn2020@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8827-9381>

Alexander A. Artemenko Dr. Sci. (Engin.), professor, equipment and materials processing technologies department, Engels Institute of Technology (branch) Yu.A. Gagarin Saratov State Technical University, sq. Svobody, 17, Engels, 413111, Russia, artemenko_58@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9443-4154>

Yuri E. Vasiliev Dr. Sci. (Engin.), professor, road building materials department, Moscow Automobile and Highway State Technical University, 64 Leningradsky Ave., Moscow, 125319, Russia, 89037500377@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8506-5027>

Contribution

Victor V. Talalai proposed a scheme of the experiment and organized production trials

Natalia V. Borisova review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

Alexander A. Artemenko consultation during the study

Yuri E. Vasiliev wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 06/04/2022	После редакции 29/04/2022	Принята в печать 01/06/2022
Received 06/04/2022	Accepted in revised 29/04/2022	Accepted 01/06/2022