УДК 621.894
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/43

Шохін М. В.
Дніпровський державний технічний університет

Гуляєв В. М.
Дніпровський державний технічний університет

Коваленко А. Л.
Дніпровський державний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ СИНТЕЗУ ФРИКЦІЙНИХ ВИРОБІВ НА ОСНОВІ ЕЛАСТОМІРНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЗНОСОСТІЙКОСТІ

Дослідження закономірностей синтезу та властивостей еластомірних матеріалів, модифікованих металами, є актуальним напрямом у сучасній хімії полімерів, і зокрема, в галузі створення фрикційних матеріалів. На сьогодні основна частина досліджень зосереджена на створенні виробів за технологією витримки еластомірних матеріалів у середовищі модифікатора. Тому, використання високодисперсних частинок металів або їх оксидів як модифікаторів і наповнювачів еластомірних матриць дасть змогу отримати нову групу термостійких матеріалів, здатних витримувати значні механічні навантаження в широкому діапазоні температур (до 500 °С). В даній роботі було розглянуто декілька методів підвищення механічних властивостей (коефіцієнта тертя і зносостійкості) виробів з еластомірних матеріалів, призначених для використання у гальмівних системах транспортних засобів. Зокрема, були проведені дослідження впливу компонентного складу дванадцяти композицій для синтезу виробів (гальмівних колодок) на їх зносостійкість в умовах, максимально наближених до реальних умов експлуатації в температурному діапазоні від 100 до 500 °С. Композиції складались з фенолформальдегідної смоли, волокнистого наповнювача, металовмісних сполук з групи Fe, Zn, Cu, Fe_2O_3, ZnO, CuO, *органічних і неорганічних модифікаторів. Як волокнистий наповнювач використовували азбест або суміш мінеральних волокон, як органічний модифікатор – речовину з групи: каучук, латекс або їхня суміш; як неорганічний модифікатор – речовину з групи: барити, крейда або їхня суміш; а також частинки кам'яного вугілля або порошок графіту. Встановлено складні залежності між компонентним складом композицій та їх механічними характеристиками (швидкістю зношення, шумом, опору тертю) і запропоновано їх оптимізований усереднений склад котрий забезпечує прийнятні показники експлуатаційних властивостей виробів з них. Рекомендації, надані в роботі, дозволять налагодити технологію виробництва гальмівних пристроїв з підвищеними трибологічними властивостями для забезпечення надійності експлуатації транспортних засобів.*

Ключові слова: *еластомір, фрикційний матеріал, модифікатор, коефіцієнт тертя, стійкість на зношення.*

Постановка проблеми. Для нафтової, газової, авіаційної, автомобільної та інших галузей промисловості необхідні ущільнювальні еластомірні матеріали та вироби, що працюють в умовах низьких і високих температур, характеризуються високою зносостійкістю. Застосовувані нині еластомірні матеріали не забезпечують весь комплекс вимог, що висуваються до ущільнювальних виробів, які використовують у рухомих вузлах і механізмах [1, с. 205624]. Тому розробка нових еластомірних матеріалів з поліпшеними фрикційними і фізико-механічними властивостями є важливою технологічною, техніко-економічною та екологічною проблемою, що має велике народногосподарське значення.

Спроби розроблення еластомірних ущільнювальних виробів, що відповідають комплексу зазначених вище вимог, виконували у двох основних напрямках – створення виробів за традиційною технологією і за технологією витримки еластомірних матеріалів у середовищі модифікатора [2, с. 172760]. Однак дедалі вищі вимоги до надійності та довговічності еластомірних ущільнювальних виробів, які працюють у режимі тертя ковзання, вимагають розроблення нового способу їх отримання.

Створення еластомірних композиційних матеріалів, що характеризуються поліпшеним комплексом спеціальних властивостей, підвищеними екологічними характеристиками, високою економічною ефективністю, інгредієнтів, які потребують великих енергетичних витрат під час виробництва, є актуальним науковим завданням. Останніми роками в різних галузях полімерної промисловості зріс інтерес до неорганічних сполук, що застосовуються як наповнювачі, так і як самостійні компоненти [3, с. 93]. Одними з таких сполук є метали (Fe, Zn, Cu) та їхні оксиди (Fe_2O_3, ZnO, CuO).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Постійно зростаюча навантаженість при вимозі мінімізації розмірів фрикційних вузлів вимагає створення нових матеріалів і вдосконалення наявних технологій їх виготовлення. Процеси порошкової металургії дають змогу створювати нові фрикційні матеріали з рівнем фізико-механічних та експлуатаційних властивостей, що перевищують характеристики матеріалів, отриманих традиційними методами металургії [4, с. 1027]. Серед великої різноманітності композиційних матеріалів, одержуваних методом порошкової металургії, особливе місце займають порошкові фрикційні матеріали на основі міді та заліза [5, с. 306]. Основними перевагами таких матеріалів є стабільне значення коефіцієнта тертя, висока зносостійкість, високий термін служби (понад 10 000 год) [6, с. 128403]. Однак недоліком цих матеріалів є залежність експлуатаційних вимог від умов навколишнього середовища.

Як полімерну сполучну речовину у фрикційних матеріалах можуть використовуватися поліефірні, епоксидні та поліамідні смоли, поліуретан, деякі флуор-вуглецеві сполуки, комбінування смол і каучуків. Останні мають досить високий коефіцієнт тертя і зносостійкість, проте ефективне застосування їх при температурі вище 200 °С неможливе [7, с. 224].

Найбільшого поширення набули сполуки на основі фенолформальдегідних смол завдяки високим фізико-механічним властивостям. Зазначається [8, с. e00680], що фрикційний матеріал із добавкою такого зв'язувального забезпечує стабільний коефіцієнт тертя в інтервалі температур 250–350 °С, зокрема в агресивних середовищах. У роботі [9, с. 321] наведено склади фрикційних матеріалів гальмівних накладок і виробів, які використовують у вузлах тертя техніки спеціального призначення. Як полімерну сполучну речовину часто застосовують фенолформальдегідні смоли, що забезпечують високу міцність зчеплення фрикційного матеріалу з металевим каркасом, високе значення коефіцієнта тертя та зносостійкість в умовах нормальної роботи й підвищених температур [10, с. 20240047].

У сучасних полімерних композиційних матеріалах використовують наповнювачі та деякі компоненти, що поліпшують технологічні та експлуатаційні властивості, вуглецевої (нанопорошки, сажі), полімерної, керамічної (глини), металічної природи з розмірами часток менше 100 нм [11, с. 2406]. Частинки таких розмірів за рівномірного їхнього розподілу в об'ємі матеріалу, що модифікується, надають нанорозмірним гетерофазним матеріалам стійкості в температурно-силових полях [12, с. 921], позитивно впливаючи на механічні, феромагнітні, сегнетоелектричні та термостабільні властивості матеріалів [13, с. 1].

Введення в структуру еластомірних композицій металів або їхніх оксидів дає змогу підвищити якість матеріалів, вироблених за піролітичною технологією, одержувати поглинальні матеріали з потрібними магнітними та діелектричними властивостями, матеріали, що екранують корпускулярні й хвильові складові іонізуючих випромінювань, конструкційні піролітичні матеріали, теплозахисні матеріали з підвищеною термічною стійкістю [14, с. 979].

Постановка завдання. Метою роботи було вишукування шляхів підвищення коефіцієнта тертя і зносостійкості виробів з еластомірних матеріалів, у склад яких входили фенолформальдегідна смола, волокнистий наповнювач, металовмісна сполука, органічний модифікатор, фрикційний модифікатор і неорганічний модифікатор. Як волокнистий наповнювач використовували азбест або суміш скляних і мінеральних волокон, як металовмісну сполуку – речовину з групи: цинк, мідь, залізо, оксиди цих металів або їхню суміш; як органічний модифікатор – речовину з групи: каучук, латекс або їхня суміш; як неорганічний модифікатор – речовину з групи: барити, крейда або їхня суміш; а також частинки кам'яного вугілля або порошку графіту.

Виклад основного матеріалу. У роботі досліджено вироби з еластомірних матеріалів, зокрема тих, що використовуються як фрикційне облицювання в гальмах, муфтах та інших деталях машин. Композиції органічних фрикційних матеріалів, які використовують для облицювання муфт і гальм транспортних засобів, повинні витримувати високі робочі температури та динамічні навантаження, що виникають багаторазово. Щоб

Таблиця 1

Склади композицій фрикційного матеріалу

Компоненти	Вміст в кожному окремому складі, мас.%											
	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	К	Л	М	Н
Азбест	50	25	25	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Скловолокно	–	–	–	14	15	16	15	15	16	15	15	15
Мінеральне волокно	–	–	–	14	16	16	15	15	17	16	15	10
Металеві частинки	5	21	22	19	17	17	18	18	4	21	19	22
Органічні модифікатори	20	–	4	–	4	3	4	4	4	4	4	3
Неорганічні модифікатори	12	17	17	16	15	8	18	18	24	7	15	8
Вугілля або графіт	–	23	24	23	25	31	22	22	26	29	24	34
Фенолформальдегідна смола	13	14	8	14	8	9	8	8	9	8	8	8

уникнути погіршення робочих характеристик і фізичного руйнування за таких умов роботи, облицювання зазвичай посилюється азбестовими волокнами, диспергованими в полімерній матриці. Більшість сучасних фрикційних матеріалів, доступних на вітчизняному ринку, мають недостатньо високий коефіцієнт тертя і зносостійкість [15, с. 120].

У результаті підбору оптимального складу композицій для приготування виробів, було досягнуто підвищення коефіцієнта тертя і зносостійкості фрикційного матеріалу. Складові сумішей для отримання композицій А–Н (таблиця 1) обробляли з отриманням фрикційних облицювань за наступною методикою.

Змішували азбестове волокно, цинковий порошок, органічні модифікатори, неорганічний модифікатор і суху фенолформальдегідну смолу до консистенції гомогенної суміші, яку поміщали у форму та спресували в брикет. Після цього брикет перенесли на прес при тиску близько 35 МПа, а температуру брикету підвищували до 135 °С. При цій температурі смола переходила у рідкий стан утворювала матрицю, яка охоплювала інші складові.

Потім брикет переносили в сушильну шафу з температурою близько 260 °С для подальшого схоплювання смоли. Поверхню тертя затверділого брикету потім відшліфували до певного розміру, що відповідає розміру гальмівної колодки. Виготовлена гальмівна колодка сполучалася з роторним вузлом гальма транспортного засобу, який був встановлений на інерційному динамометрі. За допомогою динамометра випробовували робочі характеристики та зношування залежно від температури, при цьому звертаючи увагу на зміну тертя під час тривалого використання, характерну для монолітних роторних гальм і для гальм таких типів, що використовуються в невеликих автомобілях. Гальмо діаметром 50 мм сполучалося з дисковими колодками з площею 25 см^2 та ефективним діаметром 10 см. Використовувалася шина з радіусом кочення 30 см і навантаженням на колесо 400 кг. Проводили випробування ефективності до та після полірування за температури ротора 100–500 °С.

Значення максимального зносу зразків синтезованих фрикційних матеріалів наведено на рисунку 1.

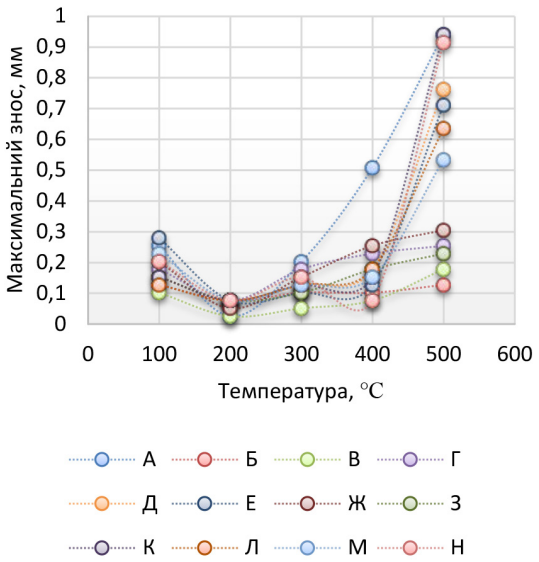


Рис. 1. Залежність максимального зносу від температури експлуатації для різних складів композицій фрикційного матеріалу

Враховуючи хорошу температурну стійкість вугілля і графіту порівняно з органічними фрикційними модифікаторами, здійснили заміну частину азбесту, що міститься у складі А (стандарт), на 23 мас.% вугілля, в результаті чого отримали склад Б (таблиця. 1). Крім того, у складі Б були відсутні органічні модифікатори складу А, а вміст металів (мідного порошку) і баритів було збільшено. Додавання вугільного матеріалу значно зменшило високотемпературне зношування в діапазоні температур 300–500 °С.

Гальмівна колодка, виготовлена зі складу Б, давала значний шум, тому склад Б модифікували, додаючи каучук, а вміст фенолформальдегідної смоли зменшили. У результаті цього отримували склад В. Хоча коефіцієнт тертя і швидкість зносу для складів Б були поліпшені порівняно зі складом А, слід враховувати, що азбест, який міститься в них, шкідливий для здоров'я людини. Тому усі наступні склади, що пройшли випробування, були виготовлені зі скловолокна або мінерального волокна. Скловолокно містило, мас.%: SiO_2 – 545; Al_2O_3 – 15,5; CaO – 17,0; MgO – 4,5; B_2O_3 – 3,5 і Na_2O – 1,0. Діаметр волокна становив 0,25–10 мм, а поверхня була оброблена силан-вмісним реактивом з метою поліпшення адгезії смоли до нього. Мінеральне волокно містило, мас.%: SiO_2 – 42; Al_2O_3 – 8; CaO – 35; MgO – 8; інші оксиди – 7, Діаметр волокна становив 1–15 мкм, довжина – 40–100 мкм. Поверхню волокна обробляли силан-вмісним реактивом для поліпшення адгезії.

Склад Б модифікували заміною азбесту, що міститься в ньому, на рівну кількість скляного волокна і мінерального волокна, в результаті чого вийшов склад Г, який працював краще у високотемпературному робочому діапазоні вище 200 °С, ніж вихідний склад А, при цьому швидкість зносу була такою ж, як для складу Б.

Склад В модифікували аналогічно. Вивчення складу Г, показало, що руйнування ротора, типове для всіх відомих аналогів, що містять скловолокно, були відсутні. Оскільки склад Г мав нижчу загальну швидкість зносу, ніж його попередники, цей склад вибрали як вихідний матеріал для модифікації з метою встановлення різних меж для сімейства вуглецевих матеріалів, які не містять азбесту.

Внаслідок доступності та дешевизни залізних частинок, в суміші Г зробили заміну оксиду цинку залізним порошком, отримавши склад Д. Частинки заліза в складі Д стабілізували коефіцієнт тертя в усьому пропонованому робочому діапазоні фрикційного матеріалу, однак швидкість зносу не відповідала швидкості складу Г за температури вище 400 °С, незважаючи на те, що швидкість зносу було значно зменшено порівняно з матеріалом, що містив азбест, у робочому діапазоні 300–400 °С.

За деяких умов фрикційні матеріали, що містять велику кількість металевих частинок або порошку, такого як залізний або мідний, створюють шум під час користування гальмами. Оскільки графіт і вугілля мають здатність поглинання шуму, випробовували ефект зміни вмісту цих речовин у складі Д з метою зменшення шуму, створюваного під час користування гальмами. У зв'язку з цим кількість вугільних частинок у складі Д було збільшено, а кількість баритів зменшено, внаслідок чого отримано склад Е. Склад Е мав підвищений коефіцієнт тертя при 200 °С з невеликим зменшенням його при 500 °С. Швидкість зносу складів Е і Д була практично однаковою.

З метою розроблення фрикційного матеріалу для великих навантажень, що має максимальний опір на знос за 500 °С, далі було отримано склади, що містять частинки з міді або на основі міді, замість залізних частинок. Склад Ж отримано зі складу Е заміною вугільних частинок на рівні кількості графіту. Коефіцієнт тертя складу Ж практично збігається з коефіцієнтом тертя складу Е, а швидкість зносу трохи зменшена, але прийнятна для гальмівних колодок більшості транспортних засобів.

Значення коефіцієнта тертя зразків синтезованих фрикційних матеріалів наведено на рисунку 2.

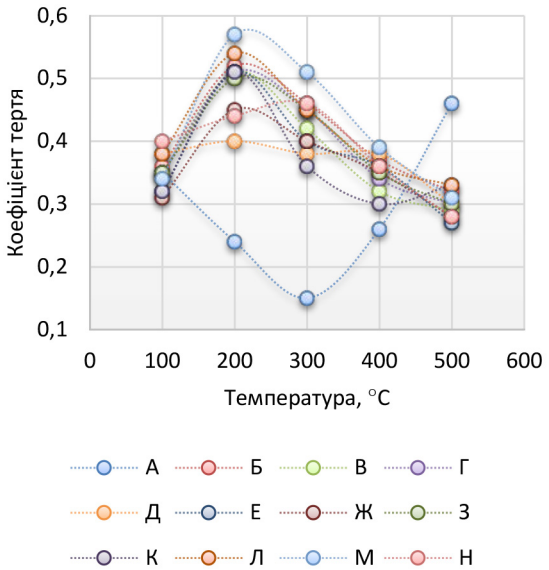


Рис. 2. Залежність коефіцієнта тертя від температури експлуатації для різних складів композицій фрикційного матеріалу

Для зменшення швидкості зносу складу Ж, всі частинки вугілля або графіту, що містяться в ньому, виготовляли виключно з великих частинок синтетичного графіту для отримання складу З. Як видно з порівняння характеристик складів Е і J (рисунки 1, 2), коефіцієнт тертя і швидкість зносу складу еквівалентні складу Е. Однак шум, спричинений колодками, що містять метал, може бути ослаблений до допустимого рівня шляхом додавання порошку графіту.

Для оцінки впливу металевого порошку або частинок на властивості фрикційних матеріалів з високим вмістом вуглецю, які не містять азбест, створено склад К, у якому відсутній металевий порошок або частинки, а вміст баритів збільшено до 18 мас.%. Коефіцієнт тертя складу К аналогічний до складу Е, що не містить азбесту, а швидкість зносу за 500 °С гірша, ніж швидкість зносу складів Е і А. Таким чином, встановлено, що склад К практично не витримує підвищених навантажень.

Для встановлення оптимального відсоткового вмісту порошку вугілля або графіту в складі Е виключили барити та відповідно збільшили вміст вугільних частинок, у результаті чого був отриманий склад Л. Оскільки швидкість зносу при високій температурі складу Е практично стабільна в діапазоні 200–400 °С, склад Е можна модифікувати шляхом зменшення вмісту мінерального волокна за подальшого збільшення вмісту вугільних частинок і за умови збереження постійного вмісту в об'ємних відсотках решти складників, унаслідок чого було отримано склад М. Коефіцієнт тертя складу М вищий за коефіцієнт тертя вихідного складу Е в усьому діапазоні температур, а швидкість зносу в діапазоні температур 100–400 °С практично еквівалентна швидкості зносу складу Л.

Оскільки мідні сплави доступніші та дешевші, ніж чиста мідь або оксиди міді, у складі Е використовували частинки мідного сплаву, в результаті чого був отриманий склад Н. Коефіцієнт тертя цього складу практично ідентичний коефіцієнту тертя складу Е, але швидкість зносу гірша у всьому діапазоні температур.

Як видно з експериментальних даних, розроблені фрикційні матеріали мають різною мірою підвищені коефіцієнт тертя і зносостійкість.

Висновки. Таким чином, проведені дослідження засвідчили складну залежність між складом еластомірних фрикційних композицій та їх механічними властивостями. Було встановлено складний зв'язок між вмістом мінеральних модифікаторів, оксидів металів і частинок вугілля (графіту) та зносостійкістю виробів. За результатами випробувань можна рекомендувати такий усереднений склад композицій, мас.%:

– фенолформальдегідна смола – 9–13;
– волокнистий наповнювач – 26–33;
– металовмісна сполука (оксиди міді, заліза або цинку) – 5–21;
– органічний модифікатор – 2–6;
– фрикційний модифікатор – 19–33;
– неорганічний модифікатор – решта.

Оптимальний склад композиції має бути підібраний для кожного окремого випадку індивідуально, з урахуванням розумного компромісу між цільовими показниками експлуатаційних властивостей виробів.

Список літератури:

1. Wang R. et al. Evaluation of fine wear particles emission from styrene-butadiene rubber reinforced with aligned carbon nanotubes: A study based on unit wear mass analysis. *Wear*. 2025. V. 562. P. 205624. https://doi.org/10.1016/j.wear.2024.205624

2. Zhang M. et al. Pilot analysis of tire tread characteristics and associated tire-wear particles in vehicles produced across distinct time periods. *Science of the Total Environment*. 2024. V. 932. P. 172760. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172760

3. Noh H. J., Jang H. Friction instability induced by iron and iron oxides on friction material surface. *Wear*. 2018. V. 400. Pp. 93–99. https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.12.025

4. Mukhopadhyay R., Sengupta R., Gupta S. D. Recent Advances in Eco-Friendly Elastomer Technology. *Current Topics in Elastomers Research*. 2008. Pp. 1021–1041.

5. Khafidh M. et al. A study on characteristics of brake pad composite materials by varying the composition of epoxy, rice husk, Al_2O_3, and Fe_2O_3. *Automotive Experiences*. 2023. V. 6. №. 2. Pp. 303–319. https://doi.org/10.31603/ae.9121

6. Nie X. et al. Advancement of plasma electrolytic oxidation towards non-valve metals. *Surface and Coatings Technology*. 2022. V. 442. P. 128403. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128403

7. Briscoe B. J., Sinha S. K. Tribology of polymeric solids and their composites. *Wear–materials, mechanisms and practice*. 2005. Pp. 223–267.

8. Saha D., Sharma D., Satapathy B.K. Challenges pertaining to particulate matter emission of toxic formulations and prospects on using green ingredients for sustainable eco-friendly automotive brake composites. *Sustainable Materials and Technologies*. 2023. V. 37. P. e00680. https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00680

9. Barton D. C., Fieldhouse J. D. Noise, vibration and harshness (NVH). *Automotive chassis engineering*. 2024. Pp. 299–360. https://doi.org/10.1007/978-3-031-57526-6_6

10. Ghani S. N., Alithari A. S., Hasan H. S. A review: Enhancing tribological properties of journal bearings composite materials. *Open Engineering*. 2024. V. 14. №. 1. P. 20240047. https://doi.org/10.1515/eng-2024-0047.

11. Huang X. et al. Advanced composite materials for structure strengthening and resilience improvement. *Buildings*. 2023. V. 13. №. 10. P. 2406. https://doi.org/10.3390/buildings13102406

12. Virmani K. et al. Nanomaterials for automotive outer panel components: a review. *The European Physical Journal Plus*. 2021. V. 136. №. 9. P. 921. https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01931-w

13. Briscoe B.J., Sinha S.K. Tribological applications of polymers and their composites: Past, present and future prospects. *Tribology and Interface Engineering Series*. 2008. V. 55. Pp. 1–14. https://doi.org/10.1016/S1572-3364(08)55001-4

14. Agarwal J. et al. Progress of novel techniques for lightweight automobile applications through innovative eco-friendly composite materials: a review. *Journal of thermoplastic composite materials*. 2020. V. 33. №. 7. Pp. 978–1013. https://doi.org/10.1177/0892705718815530

15. Zagurskiy A. Technical overview of the main types, designs, and materials of brake pads for mobile agricultural machinery. *Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*. 2024. V. 4. №. 20. Pp. 119-130. https://doi.org/10.31548/dopovidi/3.2024.119

Shokhin M. V., Gulyayev V. M., Kovalenko A. L. **STUDYING THE REGULARITIES OF SYNTHESIS OF FRICTION PRODUCTS BASED ON ELASTOMERIC MATERIALS AND WAYS TO INCREASE THEIR WEAR RESISTANCE**

The study of the regularities of the synthesis and properties of elastomeric materials modified with metals is a topical area in modern polymer chemistry, particularly in the field of friction materials. Today, most research is focused on the development of products using the technology of elastomeric material curing in a modifier environment. Therefore, the use of highly dispersed particles of metals or their oxides as modifiers and fillers of elastomeric matrices will allow the development of a new group of heat-resistant materials capable of withstanding significant mechanical loads over a wide temperature range (up to 500 °C). In this study, several methods for improving the mechanical properties (friction coefficient and wear resistance) of products made of elastomeric materials intended for use in vehicle braking systems were considered. In particular, the influence of the component composition of the 12 compositions for the synthesis of products (brake pads) on their wear resistance under conditions as close as possible to real operating conditions in the temperature range of 100–500 °C was studied. The compositions consisted of phenol-formaldehyde resin, fiber filler, metal-containing compounds from the group Fe, Zn, Cu, Fe_2O_3, ZnO, CuO, *and organic and inorganic modifiers. Asbestos or a mixture of mineral fibers was used as a fiber filler, a substance from the group of rubber, latex, or a mixture thereof as an organic modifier, a substance from the group of barites, chalk, or a mixture thereof as an inorganic modifier, and coal particles or graphite powder. Complex dependencies between the component composition and their mechanical characteristics (wear rate, noise, and friction resistance) have been established, and their optimized average composition has been proposed, which provides acceptable performance indicators for products made from them. The recommendations provided in this study will allow us to establish a technology for the production of brake devices with enhanced tribological properties to ensure the reliability of vehicle operation.*

Key words: *elastomer, friction material, modifier, friction coefficient, wear resistance.*