

Механізм тертя гальмових колодок з чавуну та композиційного матеріалу по поверхні коліс залізничного транспорту

Мазур В. Л., член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник, prof.vlm@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8970-5389>

Сіренко К. А., молодший науковий співробітник, thermoexp.metal@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2613-8094>

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

Проаналізовано механізми тертя гальмових колодок, виготовлених з чавуну та композиційного матеріалу (гумоазбестової чи гумобезазбестової суміші, у тому числі з чавунними вставками) по поверхні коліс залізничного рухомого складу. Наведено величини коефіцієнта тертя. Головна роль в механізмі тертя чавунних колодок по поверхні коліс залізничного транспорту належить мікроструктурі чавуну, а саме кількості, формі, розподілу в об'ємі включень графіту, дисперсності включень перліту та цементиту, побудові фосфідної евтектики. Механізм тертя колодок з композиційного матеріалу по поверхні коліс визначається вмістом і властивостями компонентів, з яких сформована композиційна гумосуміш, їх хімічним та гранулометричним складом, а також ступенем вигорання композиційної гумосуміші в процесі експлуатації гальмових колодок. Показано, що внаслідок відсутності регламентації в стандартах і технічних умовах на композиційні колодки відсоткового вмісту інгредієнтів та їх хімічного складу в композиційному матеріалі його властивості і величини коефіцієнта тертя є неконтрольованими. Циклічні зміни температури на поверхні контакту гальмових колодок з колесами під час гальмування потягів і високі пікові температури (до 800 °С) в окремі періоди гальмування призводять до змін структури і властивостей поверхневого прошарку металу коліс і матеріалу гальмових колодок. Зазначене відображається на фрикційних характеристиках процесу тертя гальмових колодок з колесами. Недоліком гальмових колодок з композиційного матеріалу є їх низька теплопровідність порівняно з чавунними колодками. Внаслідок цього температура в зоні контакту композиційних колодок з колесами підвищується більше, ніж при використанні колодок з чавуну. З позицій підходів класичної трибології розглянуто гідродинамічні ефекти вологи (води) в зоні контакту гальмових колодок з поверхнею коліс транспортних засобів. Досліджено мікрорельєф робочої поверхні гальмових колодок. Показано вплив різних факторів на коефіцієнт тертя гальмових колодок по поверхні коліс. Надані рекомендації щодо удосконалення стандартів і технічних умов на гальмові колодки з чавуну та інших матеріалів.

Ключові слова: гальмові колодки, колеса залізничного транспорту, тертя, чавун, композиційні матеріали, мікрорельєф поверхні.

Гальмові колодки є одним із найважливіших елементів гальмівних систем рухомого складу залізничного транспорту. Матеріали, які використовують для виготовлення гальмових колодок, мають забезпечувати високі і стабільні коефіцієнти тертя при різних швидкостях руху потягів, навантаженнях, температурах, інших умовах експлуатації.

Класичним матеріалом для виготовлення гальмових колодок, призначених для експлуатації при швидкості руху залізничних потягів до 120 км/год є чавун. Ливарне виробництво залишається традиційною галуззю виготовлення гальмових колодок для залізничного рухомого складу [1-8]. В той же час, у зв'язку з підвищенням швидкості руху залізничних потягів і намаганням покращити техніко-економічні показники їх експлуатації, в усіх країнах проводяться пошуки нових матеріалів (полімерних, керамічних тощо) для виготовлення гальмових колодок. Найбільшого поширення у цій сфері набули гальмові колодки з так званого «композиційного» матеріалу (гумоазбестової та гумобезазбестової суміші різного складу).

У міждержавному стандарті ГОСТ 33421-2015 термін «композиційна гальмова колодка» має визначення: «гальмова колодка, виготовлена вулканізацією під тиском у прес-формах багатокомпонентної суміші, яка включає в себе порошкоподібні мінеральні та інші наповнювачі, армуючі волокна і полімерне зв'язуюче з вулканізуючою групою». Гальмова колодка композиційна зі вставками – це композиційна гальмова колодка, в конструкції якої окрім композиційного матеріалу, застосовані одна чи більше вставок з матеріалу, який відрізняється від основи.

В стандартах, технічних умовах, іншій нормативно-технічній документації на гальмові колодки з композиційного матеріалу склад не вказується. Залишаються невідомими самі інгредієнти, їх кількість і відсотковий вміст у суміші, хімічний склад, властивості та інші показники. Немає методики контролю відсоткового вмісту інгредієнтів, їх хімічного складу у композиційному матеріалі колодок. Цим самим порушується законодавство України, зокрема ГОСТ 2.114-95 щодо побудови технічних умов на будь-які вироби, в тому числі й на гальмові колодки з композиційного матеріалу. Хімічний склад композиційного матеріалу повинен бути обов'язково зафіксований безпосередньо в технічних умовах на колодки чи в кресленнях цих виробів.

Незважаючи на велику кількість публікацій, присвячених аналізу фрикційних властивостей гальмових колодок з чавуну і композиційного матеріалу, однозначної позиції у цьому питанні серед дослідників немає. Наприклад, в роботі [9] та інших публікаціях Е. І. Галая зі співавторами стверджується, що при використанні композиційних колодок в гальмівних системах електропотягів, протяжність гальмівного шляху є більшою в середньому на 14 % порівняно з протяжністю гальмівного шляху потягів, оснащених чавунними гальмовими колодками. Ефективність гальмових колодок з композиційного матеріалу погіршується при швидкостях менше 70-80 км/год. Чавунні колодки забезпечують найкращу протяжність гальмівного шляху при швидкостях руху до 120 км/год. Використовувати

композиційні гальмові колодки в гальмівних системах пасажирських вагонів, які рухаються зі швидкістю більшою 120 км/год не рекомендовано [9]. Така позиція стосується і гальмових колодок з композиційного матеріалу, оснащених чавунними вставками. В технічній літературі на цю тему є й протилежні публікації, в яких стверджуються, нібито переваги композиційних колодок перед чавунними в плані фрикційних можливостей. Очевидно, що різні висновки обумовлені різними наборами компонентів, їх вмістом та хімічним складом, структурою, властивостями матеріалів, з яких колодки виготовлені. Саме тому, дослідження механізмів тертя гальмових колодок з чавуну і композиційного матеріалу (азбестової чи безазбестової гумосуміші) з чавунними вставками чи без таких вставок представляють актуальну науково-технічну задачу.

Створення нових гальмівних систем залізничного транспорту потребує удосконалення матеріалів, з яких виготовляють гальмові колодки. Вирішення цієї задачі можливо лише на базі глибокого осмислення механізмів тертя гальмових колодок з різних матеріалів по поверхні коліс рухомих засобів.

Механізми тертя по поверхні коліс чавуну і композиційної гумосуміші з різних компонентів принципово різні в режимах сухого, граничного тертя чи в умовах наявності на поверхні контакту води, вологи. Поглиблений аналіз усіх аспектів механізму тертя гальмових колодок по поверхні коліс має прояснити різноманіття явищ, які спостерігаються у цьому процесі, і виявити основні закономірності його поводження в промислових умовах при експлуатації транспортних засобів. Відразу ж зазначимо, що механізми тертя чавунних і композиційних колодок по поверхні коліс залізничного транспорту суттєво різняться внаслідок принципово різної побудови матеріалів, з яких колодки виготовлені. Чавун – це сплав, який складається, головним чином, із заліза, вуглецю та різних домішок з легуючих елементів. Композиційний матеріал – це, як було зазначено вище, багатокомпонентна суміш із різних інгредієнтів, кожен з яких забезпечує певні фрикційні характеристики матеріалу, і зв'язувального, що з'єднує компоненти суміші. В нашому прикладі – це каучук, гума. Суміші можна розділити на компоненти, з яких вони складаються. Таке найпростіше визначення понять гумосуміші й чавуну дозволяє розуміти і трактувати різницю механізмів тертя гальмових колодок з чавуну (сплаву) та з композиційного матеріалу (гумосуміші) по поверхні коліс залізничного рухомого складу.

Прийнято вважати, що чавунні гальмові колодки працюють в режимі сухого тертя [3, 10-12]. При цьому за даними авторів статті [12] знос однієї гальмової колодки масою 15...16 кг в результаті протяжності пробігу потягом шляху 30 тис. км складає 11...12 кг. Результати досліджень [13-16] свідчать, що в процесі гальмування потягів, внаслідок тертя гальмових колодок по колесам відбувається суттєвий розігрів (до 800 °С) приповерхневих (глибиною до 1 мм) прошарків металу коліс і колодок. Автори зазначених статей найбільшу увагу приділяли фазовим перетворенням структури металу коліс при їх експлуатації. В той же час підкреслили, що «гальмові колодки виконують функцію інструмента, який знімає поверхневий

шар металу (коліс), в тому числі й ділянки з невеликими поверхневими ушкодженнями».

В механізмі тертя гальмових колодок по поверхні залізничних коліс важливу роль відіграє значне підвищення температури в зоні тертя, яке виникає при гальмуванні потягів. За таких умов чавунні колодки навіть при їх тимчасовому розігріві до 800 °С майже не змінюють свої структуру і властивості. При використанні гальмових колодок з композиційного матеріалу, по-перше, сильніше нагрівається зона тертя внаслідок низької теплопровідності композитної гумосуміші порівняно з чавуном. По-друге, композиційний матеріал з причини недостатньої термостійкості при експлуатації колодок поступово вигорає та руйнується. Каучук, гума в композиті старіють. Властивості композиційного матеріалу змінюються, в тому числі й коефіцієнт тертя. Небезпека полягає ще й в тому, що температура займання гальмових колодок з композиційного матеріалу є нижчою за 500 °С.

Вплив окремих чинників на механізм тертя чавунних колодок по поверхні залізничних коліс полягає в наступному. В нашій статті [2] показано, з посиланнями на літературні джерела, що одним із основних показників якості гальмових колодок з чавуну прийнято вважати їх твердість, яка регламентується в стандартах на цю продукцію. В роботах [3-7] наведено результати досліджень впливу твердості та мікроструктури гальмових колодок з чавуну на показники гальмування залізничних потягів. За даними авторів статті [5], при швидкостях руху транспортних засобів менше 55 км/год, відстань екстреного гальмування локомотивів не залежить від твердості та мікроструктури гальмових колодок. Підвищена твердість гальмових колодок нібито знижує коефіцієнт тертя і погіршує їхні гальмівні властивості та збільшує протяжність шляху екстреного гальмування в умовах швидкості, більшій, ніж середня. Зазначимо, що в цій та багатьох інших роботах твердість і мікроструктура чавуну розглядаються як незалежні змінні, хоча фактично твердість чавуну є функцією його мікроструктури. Тому питання залежності коефіцієнта тертя гальмових колодок з колесами залізничного транспорту слід розглядати саме з такої точки зору. До того ж необхідно мати на увазі, що у відносно вузькому діапазоні 3,13-3,64 % вуглецевого еквівалента хімічного складу чавуну, твердість колодок промислових партій майже не залежить від вуглецевого еквівалента [2].

В монографії [3, с. 64] зазначається, що при твердості чавунних колодок на рівні 200...240 НВ забезпечується стабільність гальмівної сили. Колодки з твердістю чавуну 250...270 НВ характеризуються найбільшим коефіцієнтом тертя. При подальшому підвищенні твердості чавунних колодок коефіцієнт тертя знижується. Чавунні колодки з твердістю ~ 350 НВ можуть пошкоджувати поверхню коліс і створювати задири на поверхні кочення коліс.

Вплив мікроструктури чавуну на коефіцієнт тертя, як й на знос колодок, достатньо вивчено. В монографії [3] підкреслено, що феритна складова в структурі графітізованих чавунів знижує твердість колодок і

погіршує їх зносостійкість. Перліт в структурі колодок підвищує твердість і зносостійкість. Фосфіди заліза в структурі чавуну, як більш тверда складова, ніж перліт, підвищують зносостійкість колодок. При тому, що в процесі експлуатації колодок мікроструктура верхнього шару чавуну, який піддається тертю, відрізняється від його початкової структури. Можна погодитися з висновком роботи [7] та інших в тому, що підвищений вміст графіту в мікроструктурі чавуну забезпечує формування роздільного шару між поверхнями гальмової колодки і колеса. В свою чергу цей прошарок забезпечує сухе тертя поверхонь без їх пошкодження. Ця теза проходить червоною лінією за усім змістом монографії [3]. Таким чином вплив твердості чавунних колодок на коефіцієнт тертя слід розглядати виключно через вплив складових мікроструктури чавуну на умови тертя гальмової колодки по поверхні колеса транспортного засобу.

За даними роботи [3, с. 65] «залишки в мікроструктурі чавуну евтектичного цементиту за обсягом 5-10 % суттєво підвищують і твердість чавуну, і зносостійкість колодок. Коефіцієнт тертя при кількості цементиту в структурі 5-7 % може досягати максимальних значень. Але при подальшому підвищенні кількості цементиту коефіцієнт тертя зменшується». Очевидно, що наведені залежності не мають жорстко визначеного характеру, а відображають лише орієнтовні ознаки. На коефіцієнт тертя чавунних гальмових колодок по поверхні коліс рухомого складу впливає не тільки кількість цементиту в структурі чавуну, а і його форма, розташування в об'ємі чавуну, тощо. Зокрема, мікроструктура чавунних гальмових колодок і, відповідно, її вплив на коефіцієнт тертя визначається наступними складовими: графітом – формою, довжиною, розподілом, кількістю; перлітом – видом структури, вмістом, дисперсністю; фосфідною евтектикою – її побудовою, площею включень, розподілом; цементитом – вмістом, площею включень. Підкреслимо, що включення графіту в структурі чавуну гальмових колодок є фактично твердим мастилом, яке перешкоджає схоплюванню контактуючих поверхонь в зоні тертя. Чим більше масова (%) частка графіту в чавуні, тим коефіцієнт тертя менше. Доцільно нагадати, що коефіцієнт тертя композиційних колодок по поверхні коліс транспортних засобів залежить від вмісту в композиційному матеріалі компонентів, які надають мастильну дію в зоні тертя колодок з колесами. Це каучук (гума), сажа, вуглець технічний, барит тощо. Доломіт, який іноді використовують в гумосуміші замість бариту, і вважають [3, с. 78] абразивною речовиною, посилює знос контактуючих поверхонь і відповідно тертя в цій зоні.

В монографії [3, с. 45-50] наведено результати досліджень коефіцієнтів тертя гальмових колодок, виготовлених із різних чавунів. Показано, що найбільшим коефіцієнтом тертя (до значень ~ 0,3) забезпечують чавуни, леговані фосфором. При збільшенні вмісту фосфору в чавуні коефіцієнт тертя підвищується. Майже в усіх публікаціях, присвячених темі, яка розглядається, зазначено, що коефіцієнт тертя зменшується при підвищенні швидкості руху.

Прийнято вважати [11 та ін.], що в умовах сухого тертя при посиленні тиску на гальмову колодку з чавуну, коефіцієнт тертя зменшується [1]. Але за експериментальними даними, наведеними в статті [10], в умовах сухого тертя чавунних колодок для локомотивів, коефіцієнт тертя був дещо меншим при силі тиску 20 кН на колодку, ніж при силі тиску 30 кН. При тому, що залежність коефіцієнтів тертя металокерамічних колодок, які також були предметом досліджень, від сили тиску на колодку мала протилежний характер. Коефіцієнт тертя був меншим при тиску 30 кН, ніж при 20 кН. Наведені дані потребують детального осмислення і пояснення. Зразу ж відзначимо, що подача води в зону тертя металокерамічних колодок призводила до зменшення як величини коефіцієнта тертя, так і поля розкиду його величини при швидкостях руху більше ~ 50 км/год [10].

В статті [11] проаналізовано літературні дані щодо впливу на коефіцієнт тертя чавунних гальмових колодок по поверхні залізничних коліс сили тиску колодки на колесо, швидкості гальмування, температури в зоні тертя, ступеня вологості гальмової колодки, тобто наявності води на поверхні тертя. Загальний висновок авторів цієї статті полягає в тому, що результати дослідження в сфері, яка розглядається, та наведені експериментальні дані не створюють єдиного розуміння механізмів тертя гальмових колодок по поверхні гальмових коліс залізничного транспорту. Погляди різних авторів збігаються в тому, що, з підвищенням швидкості гальмування потягів, коефіцієнт тертя колодок по поверхні коліс зменшується в усіх випадках. При підвищенні температури чавунних гальмових колодок коефіцієнт тертя може незначно збільшуватися або залишатися майже незмінним.

Коефіцієнт тертя може збільшуватися, а може й зменшуватися при змочуванні водою зони тертя гальмової колодки з колесом залежно від сили тиску колодки на колесо і швидкості гальмування. За даними роботи [11] при швидкості гальмування 25 км/год при тиску на колодку 5; 6 і 12 кгс/см², наявність вологи зменшує коефіцієнт тертя мокрих колодок порівняно із сухими на $\sim 14,1$ - $18,7$ %. При швидкості 100 км/год і наявності води коефіцієнт тертя збільшується на $15,2$ - $24,2$ %. Ці дані свідчать про те, що механізм впливу води на коефіцієнт тертя залежить не тільки від факту присутності вологи в зоні контакту колодки з колесом, а й від інших факторів та гідродинамічних ефектів [17].

Коефіцієнт тертя визначає не тільки знос гальмових колодок при експлуатації їх на залізничному транспорті, а й параметри процесу гальмування потягів, стійкість поверхні коліс рухомих засобів проти утворення дефектів. Відповідно до класичної теорії трибології [18], сила навантаження зони тертя колодки з колесом і температура в цій зоні є основними факторами, що визначають механізм тертя і зносостійкості контакту. При цьому швидкість переміщення колодки відносно поверхні колеса, обумовлена швидкістю гальмування, є головною характеристикою зношування контактуючих поверхонь.

На відміну від механізму тертя чавуну, іншого сплаву чи металу по поверхні сталі (в нашому випадку чавунних колодок по поверхні коліс залізничного транспорту), де, як зазначено вище, вирішальний вплив

на коефіцієнт тертя мають розміри і форма включень графіту, перліту, цементиту, фосфідної евтектики в структурі чавуну, механізм тертя композиційного матеріалу визначається відсотковим вмістом в гумосуміші компонентів різного призначення. Зокрема, абразивних (доломіт та ін.) і неабразивних (барит, сажа, мелена сірка тощо) складових [3, с. 78-83]. Кожний компонент в гумосуміші впливає на умови тертя в контактній зоні практично незалежно. В таких умовах мають значення розміри часток компонентів гумосуміші, їх гранулометричний склад, який залежить від тонкості помелу вихідної сировини.

Складність аналізу умов тертя композиційних колодок по поверхні коліс і оцінки коефіцієнта тертя полягає, перш за все, в тому, що гумокомпозиційний матеріал є сумішшю, яка складається з різних за дисперсністю і твердістю часток, а також з волокнистих наповнювачів. В патенті [19], наприклад, зазначено, що коефіцієнт тертя фрикційного матеріалу колодки зі сталлю дорівнює 0,3-0,7, допустима лінійна зношувальність зі сталлю – не більше 0,15 мм, границя міцності колодок – не менша 15,0 МПа. Аналогічні фізико-механічні показники композиційного матеріалу в початковому стані наведені й в інших літературних та патентних джерелах. Але без інформації щодо відсоткового вмісту у композиційному матеріалі кожного компонента (інгредієнта) та їхнього хімічного складу, розміру часток фрикційних речовин тощо, висновки відносно умов і механізму тертя можна розглядати лише як перше наближення.

Однозначний, підтверджений практикою висновок полягає в тому, що гальмові колодки з композиційного матеріалу сприяють появі різних дефектів (тріщин, раковин, повзунів тощо) на поверхні кочення коліс [3, 10, 15, 20 та ін.]. Зазначений ефект пошкодження поверхні коліс гальмовими колодками обумовлено специфікою тертя композиційного матеріалу колодок по поверхні коліс залізничного транспорту. Цим визначається і експлуатаційна стійкість композиційних колодок, в тому числі стійкість композиційних колодок з чавунними вставками. В доповнення до результатів, наведених в нашій статті [1], зазначимо наступне.

Експлуатаційна стійкість композиційних колодок з чавунними вставками, які активно рекламуються навіть в деяких наукових статтях, визначається зносостійкістю чавунних вставок, оскільки чавун зношується швидше, ніж гумокомпозитна суміш. В разі зносу чавунних вставок в композиційній колодці її подальше використання стає неможливим і колодка потребує заміни. Тривалість експлуатації композиційних колодок з чавунними вставками не може бути більшою, ніж повністю чавунних колодок, оскільки ресурс експлуатації як перших, так і других колодок залежить від зносостійкості виключно чавуну. Чим краща якість чавунних вставок, тим працездатність гальмових композиційних колодок з чавунними вставками вища.

Варто підкреслити, що чавунні вставки в композиційних колодках виготовляють з рядового чавуну. Хімічний склад, мікроструктура і властивості чавуну, з якого виготовляють вставки, не визначені в технічних

умовах на композиційні колодки з вставками. Повністю чавунні колодки виготовляють з високоякісного чавуну, хімічний склад, мікроструктура і властивості якого регламентовані у стандартах. Тому саме чавунні колодки більш зносостійкі, ніж чавунні вставки в композиційних колодках. Відповідно твердження, що композиційні колодки з чавунними вставками в 3-4 рази зносостійкіші за чавунні не відповідають реальності.

Чавунні вставки у композиційних колодках змінюють умови і коефіцієнт тертя колодок по поверхні коліс [1]. При цьому чавунні вставки не рятують композиційні колодки від їх недоліків: низької теплопровідності та посиленого пошкодження поверхні коліс рухомого складу композиційною гумосумішшю. Підкреслимо також, що відповідно до законодавства України в технічних умовах на гальмові композиційні колодки з чавунними вставками мають бути регламентовані хімічний склад і мікроструктура чавуну вставок, подібно до того, як визначено вимоги до чавуну у стандартах на чавунні колодки.

На превеликий жаль, в Технічних умовах на гальмові колодки композиційні з чавунними вставками ТУ У 23.9-35046274-053:2015 і ТУ У 30.2-35046274-059:2016 не регламентовано ні хімічний склад композиту, ні хімічний склад чавуну, з якого виготовлені вставки. Надано посилання тільки на ГОСТ 1412-85. Але в цьому стандарті представлено дев'ять марок чавуну від СЧ10 до СЧ35. І чавун кожної марки має свій конкретний хімічний склад, свої особливі мікроструктуру, механічні та інші властивості. Все зазначене призводить до різних величин коефіцієнта тертя чавунних вставок і загалом колодок композиційних з чавунними вставками. Нестабільність коефіцієнту тертя композиційних гальмових колодок є недоліком, позбавитися від якого можна і необхідно шляхом регламентації відсоткового вмісту компонентів композиційного матеріалу, їх хімічного складу в технічних умовах на колодки, а також хімічного складу та властивостей чавунних вставок. Для покращення експлуатаційних характеристик композиційних колодок з чавунними вставками можна рекомендувати вставки виготовляти з високоміцного чавуну з кулеподібним (кулястим) графітом в його мікроструктурі.

Особливість механізму тертя композиційного конгломерату полягає в тому, що в процесі зношування колодки окремі найбільш великі й тверді частки одного чи декількох інгредієнтів, які виконують фрикційні функції, після видалення з масиву гумосуміші, не виносяться за межі зони контакту і тертя колодки з колесом, а завдяки каучуковому (гумовому) зв'язуючому залишаються в цій зоні. Внаслідок високої твердості, ці частки, в буквальному сенсі, шкрябають робочу поверхню коліс, поступово її пошкоджують і призводять до виникнення дефектів. Окремі компоненти гумосуміші працюють в зоні тертя колодки з колесом по суті індивідуально, у відриві від цілісного фрикційного елемента колодки. Забруднення абразивними частками поверхні тертя колодки з колесом інтенсифікує процес їх зношення. Відповідно до постулатів класичної теорії трибології забруднення абразивними частками мастильно-охолоджувальної рідини,

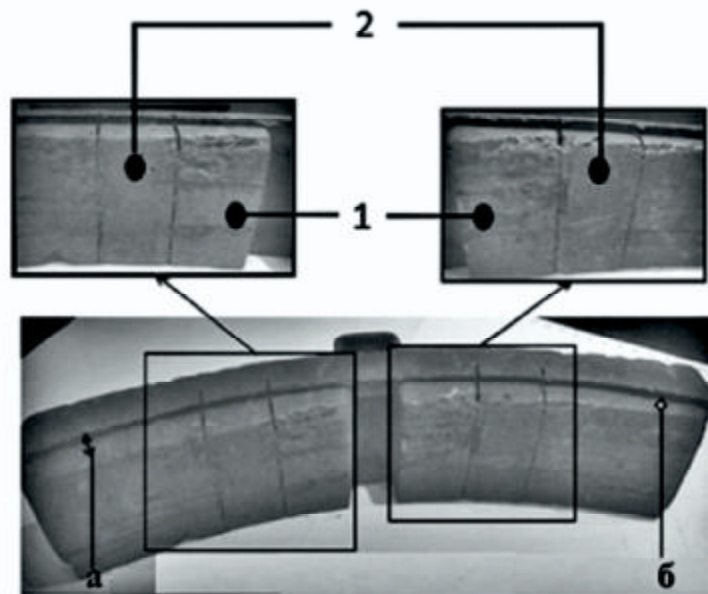
присутньої в зоні тертя, призводить і до виникнення ерозійного зношення, яке інтенсифікує цей процес [18, с. 81]. В монографії [17, с. 340-373] запропоновано спрощене рішення задачі формування мікрорельєфа контактуючих поверхонь при забрудненні зони тертя частками дисперсної фази на прикладі процесу прокатки.

В доповнення до викладеного вище акцентуємо увагу, що на відміну викладеному погляду на механізм тертя гальмових колодок з композиційного матеріалу по поверхні коліс залізничного транспорту, особливість контактування і тертя чавунних колодок з колесами полягає в тому, що при їх зношуванні чавун колодок може видаляти поверхневий шар металу коліс разом з невеликими поверхневими ушкодженнями [13], й тим самим, певною мірою, полірувати робочу поверхню коліс. Цей ефект відомий з теорії трибології [18, с. 81] і нерідко проявляється на практиці [3].

У тексті патенту [21], наприклад, зазначено, що чавун у фрикційному матеріалі колодок очищує поверхню коліс у процесі тертя. Чавун вставок у композиційних колодках або повністю чавунних колодок заповнює мікротріщини на поверхні колеса, запобігаючи тим самим розвитку дефектів і збільшуючи ресурс експлуатації коліс. Аналогічні погляди висловлені в монографії [3]. Найефективнішим у цьому плані є високоміцний чавун з кулеподібним графітом, застосування якого для виготовлення гальмових колодок залізничного транспорту має поширюватися.

При розгляді впливу різних факторів на умови тертя і зношування в зоні трибологічного контакту гальмових колодок з колесами залізничного транспорту, слід звернути увагу на формування мікрорельєфу контактуючих поверхонь. В нашій статті [1] представлені фотознімки мікрорельєфу поверхні зразків композиційного матеріалу в сухому і мокрому стані та фото поверхні чавунної вставки гальмової колодки. Ці знімки демонструють зернисту структуру конгломерату композиційної гумосуміші. В процесі експлуатації мікрорельєф поверхні чавунних колодок та чавунних вставок у композиційних колодках приймає вигляд однорідної шорсткості, яка складається з мікронерівностей у вигляді довгих та вузьких гребенів, рисок, орієнтованих у напрямі тертя. Такий мікрорельєф відноситься до паралельного типу [17, с. 168-171]. Висота мікрорельєфа робочої поверхні чавунних колодок по ходу їх зношування суттєво не змінюється і знаходиться на рівні $Ra \approx 1...2$ мкм. На відміну від чавунних колодок мікрорельєф робочої поверхні фрикційного матеріалу (гумосуміші) композиційних колодок під впливом навантаження і температури в процесі їх експлуатації трансформується кардинально. В початковому вихідному стані робоча поверхня гумосуміші композиційних колодок має однорідний ізотропний мікрорельєф величиною $Ra \approx 1,0...1,5$ мкм. Оскільки в процесі зносу композиційного матеріалу на його поверхню виходять великі частки твердих компонентів суміші, то в результаті мікрорельєф відображає скупчення часток, а висота мікронерівностей дорівнює приблизно розмірам зазначених часток. Гумове, каучукове зв'язуюче у складі гумосуміші

поступово руйнується в процесі експлуатації композиційних колодок. Оскільки відносно пориста гумосуміш вбирає в себе вологу, то у зимовий період колодки при замерзанні вкриваються льодом, що також сприяє руйнуванню композиційного матеріалу. На рисунку наведено типовий приклад робочої поверхні зношених композиційних колодок. Оцінювати таку поверхню стандартизованими показниками мікрорельєфу, шорсткості неможливо. Взимку композиційні колодки суттєво втрачають свої службові властивості [10] і потребують заміни на чавунні.



Мікрорельєф робочої поверхні дуально зношеної гальмової колодки з композиційного матеріалу і чавунними вставками: а – зона мінімального зносу; б – зона максимального зносу; 1 – композиційний матеріал; 2 – чавунні вставки.

Microrelief of the working surface of a dually worn brake pad made of composite material with cast iron inserts. а – minimum wear zone; б – maximum wear zone; 1 – composite material; 2 – cast iron inserts.

Науковий інтерес в темі тертя і зносостійкості гальмових колодок з різних матеріалів та їх впливу на утворення дефектів поверхні коліс залізничного транспорту представляють дослідження В. Г. Равлюка [22] ефекту так званого фрикційного дуального зносу гальмових колодок. Результати досліджень і надані в статтях цього автора рекомендації щодо забезпечення рівномірності зносу колодок заслуговують на впровадження в практичній діяльності залізниці. Аналізуючи результати роботи [22], зазначимо, що дуальне зношення робочого тіла колодки (рисунок) обумовлено різними умовами тертя на різних ділянках загальної гальмової площі колодок. Очевидно, що перспективу мають гальмові колодки, матеріал яких має покращену зносостійкість на ділянках, схильних до найбільш

інтенсивного тертя з поверхнею коліс. Наприклад, ці ділянки колодок, оснащувати вставками із спеціального чавуну чи інших зносостійких матеріалів.

Зазначимо також, що внаслідок молекулярно-механічного тертя по поверхні коліс залізничного транспорту і зносу композиційних гальмових колодок утворюються і викидаються у навколишнє середовище шкідливі хімічні речовини, сполуки [25-27]. Тому при удосконаленні композиційного матеріалу гальмових колодок необхідно проводити токсикологічно-гігієнічну та екологічну експертизу продуктів зносу матеріалу колодок в процесі тертя на предмет їх безпечності для людей і навколишнього середовища. Цей аспект проблеми, що розглядається, потребує окремого детального обговорення.

На завершення викладеного аналізу підкреслимо, що для ідентифікації гальмових колодок з точки зору їх фрикційних властивостей доцільно орієнтуватися на загальні умови сертифікації композиційних гальмових колодок, що представлені у документі UIC 541-4 OR «Гальма з композиційними гальмовими колодками» членів Міжнародного союзу залізниць Європейського Союзу. Згідно з цим документом гальмові колодки можуть виконуватися з високим, середнім і низьким рівнем тертя. При удосконаленні технічних умов на колодки гальмові для залізничного транспорту, що діють в Україні, мають бути враховані європейський досвід експлуатації гальмівних систем транспортних засобів, а також позитивні напрацювання у сфері стандартизації вимог до фрикційних показників матеріалу гальмових колодок.

Висновки

1. Механізми тертя чавунних і композиційних колодок з поверхнею коліс залізничного транспорту різні. Коефіцієнти тертя гальмових колодок з композиційного матеріалу по поверхні коліс залізничного транспорту мають більшу нестабільність, ніж коефіцієнти тертя чавунних колодок. Причина полягає, по-перше, в тому, що в стандартах і технічних умовах на композиційні колодки не регламентується вміст компонентів композиційного матеріалу, їх гранулометричний та хімічний склад. А це допускає можливість безконтрольно змінювати склад матеріалу колодок при їх виготовленні. По-друге, композиційний матеріал колодок внаслідок суттєво гіршої, ніж чавун теплопровідності, не спроможний забезпечити стабільну температуру в зоні тертя. По-третє, в процесі експлуатації колодок композиційний матеріал внаслідок циклічних коливань температури в зоні тертя і низької, порівняно з чавуном, термостійкості погіршує свої властивості, в тому числі змінює коефіцієнт тертя. По-четверте, в зимовий період відносно пористий композиційний матеріал (гумосуміш) колодок вбирає в себе вологу і при замерзанні схильний до руйнування.

2. У зв'язку з невизначеністю в технічних умовах і неконтрольованості на практиці відсоткового вмісту різних компонентів у композиційний гумосуміші та їх хімічного складу, значення коефіцієнтів тертя композиційних

гальмових колодок по поверхні коліс можуть бути як більшими, так й меншими, ніж величини коефіцієнтів тертя чавунних колодок.

3. Вирішальний вплив на коефіцієнт тертя чавунних колодок по поверхні коліс залізничного транспорту має мікроструктура чавуну, зокрема форма включень графіту в його структурі. Твердість чавуну може опосередковано впливати на коефіцієнт тертя через залежність чи незалежність твердості від розмірів і форми другої фази (графіту, цементиту, перліту тощо) в структурі чавуну. У відносно вузькому діапазоні вуглецевого еквівалента хімічного складу чавуну ($C_{\text{екв}} = 3,13-3,64 \%$) залежність твердості НВ чавунних колодок від $C_{\text{екв}}$ не простежується. Передбачений в стандартах на чавунні гальмові колодки хімічний склад чавуну сприяє формуванню мікроструктури, необхідної для забезпечення потрібних величин коефіцієнта тертя.

4. З підвищенням швидкості руху потягів і гальмування коефіцієнт тертя чавунних колодок по поверхні коліс рухомого складу зменшується. В технічній літературі ця закономірність представлена різними формулами залежно від матеріалів пари тертя і умов проведення досліджень. Наявність води (вологи) на поверхні контакту гальмової колодки з колесом, в більшості випадків, зменшує коефіцієнт тертя. Але цей ефект потребує додаткового дослідження.

5. В промисловій практиці, при споживанні гальмових колодок, коефіцієнти тертя відповідно до значень, регламентованих у стандартах чи технічних умовах, як правило, не перевіряють, вважаючи, що зазначені величини мають забезпечуватися хімічним складом матеріалу колодок і технологією їх виготовлення. При удосконаленні діючих і створенні нових стандартів і технічних умов на гальмові колодки з чавуну та композиційного матеріалу в них доцільно внести корективи щодо переліку контрольованих показників якості цих виробів.

6. Мікрорельєф поверхні гальмових колодок, особливо колодок з композиційного матеріалу, суттєво змінюється в процесі їх експлуатації. В зимовий період вологий поверхневий шар композиційного матеріалу колодок внаслідок замерзання руйнується, його мікрорельєф втрачає свої характеристики, коефіцієнт тертя змінюється.

7. Для покращення експлуатаційних характеристик гальмових композиційних колодок з чавунними вставками доцільно виготовляти чавунні вставки з високоміцного чавуну з кулеподібним графітом в його мікроструктурі.

Література

1. Сіренко К.А. Коефіцієнти тертя між колесами залізничного транспорту і гальмовими колодками з чавуну та композиційного матеріалу: порівняльний аналіз // Метал і лиття України. – 2022. – № 1 (328). – С. 91-101. <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.03.096>

2. Сиренко К.А. Характеристика твердості чавунних гальмових колодок залізничного транспорту // Метал і лиття України. – 2022. – № 3 (330). – С. 96-101. <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.03.0963>
3. Неижко И.Г., Найдек В.Л., Гаврилюк В.П. Тормозные колодки железнодорожного транспорта: монография. Киев: ФТИМС НАН Украины, 2009. – 121 с.
4. Климов А.А., Домнин С.В., Стручков А.В., Кирпиченко В.П., Ильинский В.П., Бондарик В.Б. Влияние микроструктуры и твердости тормозной локомотивной колодки на трещинообразование чугуна // Системы. Методы. Технологии. – 2016. – № 2 (30). – С. 64-68.
5. Климов А.А., Стручков А.В. Результаты исследования влияния твердости и микроструктуры тормозных локомотивных колодок на экстремальное торможение локомотива // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 71-76.
6. Климов А.А., Домнин С.В., Стручков А.В., Бондарик В.Б. Исследование структуры и твердости тормозных колодок на износ бандажей колес локомотивов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2017. – № 1 (53). – С. 215-218.
7. Климов А.А., Стручков А.В., Бондарик В.Б., Ильинский В.П., Домнин С.В., Кирпиченко В.П. Влияние состава и микроструктуры тормозных локомотивных колодок на трибологические свойства // Вестник ИрГТУ. – 2017. – Том 21, № 11. – С. 179-190.
8. Сиренко Е.А. Особенности литейного чугуна для тормозных колодок железнодорожного транспорта // Литье и металлургия. – 2022. – № 1. – С. 43-48. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-43-48>
9. Галай Э.И., Рудов П. К. Эффективность торможения пассажирских поездов – фактическая и по нормативам // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2006. – Вип. 11. – С. 116-119. http://eadnurt.diit.edu.ua/bitstream/123456789/4611/1/Visnyk_11.pdf
10. Берент В.Я., Берент В.В. Целесообразность использования металлокерамических тормозных колодок // Сборка в машиностроении, приборостроении». – 2017. – Том 18, № 8. – С. 355-360.
11. Корсун А.А. Иванов П.Ю., Осипов Д.В., Тихонов Д.А. Анализ факторов, влияющих на коэффициент трения тормозной колодки подвижного состава // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – №2 (74). – С. 91-100. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2022.2\(74\).91-100](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2022.2(74).91-100)
12. Бондарик В.Б., Мельниченко О.В. Сравнительный анализ тормозных колодок и их влияние на износ колесных пар тягового подвижного состава // Электронный научный журнал «Молодая наука Сибири». Иркутский государственный университет путей сообщения. Иркутск. – 2021. – № 3 (13).
13. Вакуленко, І. О. Залежність структурних перетворень по поверхні кочення залізничних коліс від типу гальмівної системи // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 24. – С. 192-194.
14. Вакуленко І.О., Перков О.М., Анофрієв В.Г., Крот В. С. Аналіз причин виникнення дефектів на поверхні кочення залізничних коліс // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. – 2008. – Вип. 21. – С. 269-271.
15. Грищенко М. А. Дослідження причин виникнення вищербин металу на поверхні кочення залізничних коліс // Вісник Дніпропетровського національного

- університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 23. – С. 178-182. http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt_2008_23_39
16. Грищенко М.А. Причини виникнення дефектів на поверхні кочення залізничних коліс // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 27. – С. 223-225. <https://doi.org/10.15802/stp2009/14305>
 17. Мазур В.Л., Тимошенко В.М. Теория и технология прокатки (гидродинамические эффекты смазки и микрорельеф поверхности). Киев. ИД «АДЕФ Украина», 2018. – 560 с.
 18. Справочник по триботехнике / Под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. В 3 т. Т. 1. Теоретические основы. М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.
 19. Гальмівна колодка рухомого складу залізничного транспорту / С.М. Литвинський // Опис до патенту на корисну модель. UA 102172.26.102172. Бюл. № 20.
 20. Гальмова колодка / Матус МБА, Рженок Отакар // Опис до патенту на винахід. UA 112762. 10.10.2014. Бюл. № 19; 25.10.2016. Бюл. № 20.
 21. Гальмова колодка залізничного транспортного засобу / А.І. Ворончihin, В.І. Налев, В.Н. Бичков та ін. // Опис до патенту на колісну модель. UA № 61367. 11.07.2011. Бюл. № 13.
 22. Равлюк В. Г. Дефініція особливостей дуального зносу гальмових колодок вантажних вагонів // Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – 2019. – Вип. 183. – С. 46-59 <https://doi.org/10.18664/1994-7852.183.2019.169643>
 23. Шафран Л. М., Мазур В.Л., Большой Д.В., Пихтеева О.Г., Третьякова О.В., Потапов Є.А., Третьяков О.М., Міхалькова С.Г. Токсиколого-гігієнічні та екологічні аспекти безпеки гальмових систем рухомого складу залізничного транспорту. Частина 1. Міграція шкідливих речовин у довкілля // Актуальні проблеми транспортної медицини. 2022. – № 1 (67). – С. 7-18.
 24. Шафран Л. М. Токсиколого-гігієнічні та екологічні аспекти безпеки гальмових систем рухомого складу залізничного транспорту. Частина 2. Забруднення довкілля важкими металами та азбестом. Актуальні проблеми транспортної медицини. – 2022. – № 2 (68). – С. 15-26.
 25. Мазур В. Л., Найдек В. Л., Попов Є. С. Порівняння чавунних і композиційних з чавунними вставками гальмових колодок для рухомого складу залізниці // Метал і лиття України. – 2021. – Т. 29, № 2 (325). – С. 80-89. <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.02.080>

References

1. Sirenko K.A., *Met. lit'e Ukr.*, 2022, vol. 30, No. 1 (328), pp. 91-101 [in Ukrainian] <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.03.096>
2. Sirenko K.A., *Met. lit'e Ukr.*, 2022, vol. 30, No. 3 (330), pp. 96-101 [in Ukrainian] <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.03.096>
3. Neizhko I.G., Naidek V.L., Gavrilyuk V.P. *Tormoznyye kolodki zheleznodorozhnogo transporta* (Railway brake pads), Kyiv, PTIMA NAS of Ukraine, 2009, 121 p. [in Russian].
4. Klimov A.A., Domnin S.V., Struchkov A.V., Kirpichenko V.P., Ilinsky V.P., Bondarik V.B., *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, 2016, No. 2 (30), pp. 64-68 [in Russian].
5. Klimo A. A., Struchkov A. V. Vestnik PNIPU. Mashinostroyeniye, materialovedeniye, 2019, Vol. 21, No. 1, pp. 71-76 [in Russian].

6. Klimov A.A., Domnin S.V., Struchkov A.V., Bondarik V.B. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye*, 2017, No. 1 (53), pp. 215-218 [in Russian].
7. Klimov A.A., Struchkov A.V., Bondarik V.B., Ilyinsky V.P., Domnin S.V., Kirpichenko V.P., *Vestnik IrGTU*, 2017, Vol. 21, No. 11, pp. 179-190 [in Russian].
8. Sirenko E.A., *Lit'ye i metallurgiya*, 2022, No.1, pp. 43-48 [in Russian] <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-43-48>
9. Galaj E. I., Rudov P. K., *Visnyk Dnipropetrovskoho Natsionalnoho Universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana*, 2006, No. 11, pp. 116-119 [in Russian].
10. Berent V.V., Berent V.V., *Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii*, 2017, Vol. 18, No. 8, pp. 355-360 [in Russian].
11. Korsun A.A., Ivanov P.Yu., Osipov D.V., Tikhonov D.A., *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye*, 2022, No. 2 (74). pp. 91-100 [in Russian]. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2022.2\(74\).91-100](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2022.2(74).91-100)
12. Bondarik V.B., Melnichenko O.V., Electronic scientific journal «Molodaya nauka Sibiri», 2021, No. 3 (13) [in Russian].
13. Vakulenko I.O., Perkov O.M., Anofriev V.H., Krot V.S., *Visnyk Dnipetrovs'koho natsional'noho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana*, 2008, No. 21, pp. 269-271. [in Ukrainian].
14. Vakulenko I. O. *Visnyk Dnipetrovs'koho natsional'noho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana*, 2008, vol. 24, pp. 192-194. [in Ukrainian].
15. Hryshchenko M.A. *Visnyk Dnipetrovs'koho natsional'noho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana*, 2008, No. 23, pp. 178-182 [in Ukrainian].
16. Hryshchenko M.A. *Visnyk Dnipetrovs'koho natsional'noho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana*, 2009, vol. 27, pp. 223-225. [in Ukrainian] <https://doi.org/10.15802/stp2009/14305>
17. Mazur V.L., Timoshenko V.I. *Teoriya y tekhnolohyya prokatky (hydrodynamicheskiye ŗffekty smazky y mykrorel'ef poverkhnosti)*, (Theory and technology of rolling (hydrodynamic effects of lubrication and surface microrelief)), Kyiv: ID «ADEF Ukraine», 2018, 560 p. [in Russian].
18. *Spravochnik po trybrotekhnike* (Handbook of tribotechnics), Under the general. ed. M. Hebdy A.V. Chichinadze. In 3 vols. T. 1. Theoretical foundations. M., Mechanical engineering. 1989. 400 p. [in Russian].
19. Litvinsky S.M. *Hal'mivna kolodka rukhomoho skladu zaliznychnoho transportu* (Brake pad of rolling stock of railway transport. Description of the utility model patent), UA 102172.26.102172. Bull. No. 20 [in Ukrainian].
20. *Hal'mova kolodka* (Matus MBA), Rzhelok Otakar, 2014. Brake shoe. Description of the patent for the invention. UA 112762. 10/10/2014 Bull. No. 19; 10/25/2016. Bull. No. 20 [in Ukrainian].
21. *Hal'mova kolodka zaliznychnoho transportnoho zasobu* (Brake pad of a railway vehicle), A.I. Voronchikhin, V.I. Nalev, V.N. Bychkov and others, Description to the patent for the wheel model. UA № 61367. 11.07.2011. Bull. No. 13 [in Ukrainian].
22. Ravlyuk V. H. *Zbirnyk naukovykh prats' UkrDUZT*, 2019, Vol. 183, pp. 46-59 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.183.2019.169643>

23. Shafran L. M., Mazur V.L., Bolshoy D.V, Pykhtieieva E.G., Tretyakova E.V., Potapov E.A., Tretyakov A.M., Mikhalkova S.G. *Aktual'ni problemy transportnoi medytsyny*, 2022, No. 1 (67), pp. 7-18 [in Ukrainian].
24. Shafran L. M., Mazur V. L., Bolshoy D. V., Pykhtieieva E. G., Tretyakova E. V., Potapov E. A., Tretyakov O. M., Pykhtieiev D. M., *Aktual'ni problemy transportnoi medytsyny*, 2022, No. 2 (68), pp. 15-26 [in Ukrainian].
25. Mazur V. L., Naidek V. L., Popov Ye. S. *Metal i lyttya Ukrayiny*, (2021), Vol. 29, No. 2 (325), pp. 80-89 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.02.080>

Одержано 23.02.23

V. L. Mazur, K. A. Sirenko

Friction mechanisms of brake pads made of cast iron and composite material on the surface of railway wheels

Summary

The friction mechanisms of brake pads made of cast iron and composite material (rubber-asbestos or rubber-free mixtures, including those with cast-iron inserts) on the surface of wheels of railway rolling stock were analysed. Values of the friction coefficient are given. The main role in the mechanism of friction of cast iron pads on the surface of railway wheels belongs to the microstructure of cast iron, namely, the amount, shape, distribution in volume of graphite inclusions, dispersion of pearlite and cementite inclusions, and the construction of phosphide eutectics. The friction mechanism of pads made of composite material on the wheel surface is determined by the content and properties of the components from which the composite rubber mixture is formed, their chemical and granulometric composition, as well as the degree of burnout of the composite rubber mixture during the operation of the brake pads. It is shown that due to the lack of regulation in the standards and technical conditions for composite blocks of the percentage content of ingredients and their chemical composition in the composite material, its properties and the value of the coefficient of friction are uncontrolled. Cyclic temperature changes on the contact surface of the brake pads with the wheels during train braking and high peak temperatures (up to 800 °C) in individual periods of braking lead to changes in the structure and properties of the surface layer of the metal of the wheels and the material of the brake pads. This is reflected in the frictional characteristics of the friction process of brake pads with wheels. The disadvantage of brake pads made of composite material is their low thermal conductivity compared to cast iron pads. As a result, the temperature in the contact zone of composite pads with wheels increases more than when using pads made of cast iron. The hydrodynamic effects of moisture (water) in the contact zone of brake pads with the surface of vehicle wheels are considered from the standpoint of classical tribology approaches. The microrelief of the working surface of the brake pads was studied. The influence of various factors on the coefficient of friction of the brake pads on the surface of the wheels is shown. Recommendations are provided for improving standards and technical conditions for brake pads made of cast iron and other materials.

Keywords: brake pads, wheels of railway transport, friction, cast iron, composite materials, surface microrelief.