

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

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

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

Вибір чавуну для вставок у фрикційний елемент гальмівних колодок рухомого залізничного транспорту

Наведено огляд публікацій, присвячених оцінці ефективності матеріалів, які застосовують для виготовлення гальмівних колодок рухомого складу залізниці. Порівняно хімічний склад, механічні властивості та експлуатаційні характеристики чавунних і композиційних колодок, виготовлених із гумосуміші, в тому числі оснащених вставками із чавуну. Показано, що хімічний склад і механічні властивості чавунних гальмівних колодок відповідають вимогам, регламентованим у стандартах, зокрема в ГОСТ 30249-97, який нині діє в Україні. Композиційні гальмівні колодки виготовляють за технічними умовами, в яких вимоги до відсоткового вмісту компонентів композиційної гумосуміші та їх хімічний склад не регламентовані, що є порушенням ГОСТ 2.114-95. Зазначене виключає можливість контролювати основні показники якості колодок їх споживачами. Підтверджено, що головний недолік композиційних гальмівних колодок полягає в суттєво низькій теплопровідності композиційної гумосуміші порівняно з теплопровідністю чавуну. Внаслідок низької теплопровідності фрикційного елемента гальмівних колодок, виготовленого із такого композиційного матеріалу, і, як результат, недостатнього тепловідводу із зони тертя колодки з колесом при гальмуванні потягу, температура в цій зоні може досягти 900 °С. При тому, що температура самозаймання композитної гумосуміші складає (300...550) °С згідно з даними технічних умов на композиційні колодки. Підвищення температури змінює умови тертя колодок по поверхні кочення коліс і погіршує зносостійкість колодок. Для послаблення негативного впливу низької теплопровідності композитної гумосуміші фрикційний елемент гальмівних композиційних колодок оснащують вставками із чавуну, який має відносно високу теплопровідність. Таке рішення позитивно відображається на температурному режимі колодок і коліс, але не забезпечує кардинального покращення тепловідводу із зони контакту гальмівних колодок з колесами рухомих засобів. Розглянуто механізм впливу температури в зоні контакту колодки з колесом на виникнення дефектів поверхні кочення коліс. Відмічено токсичність гальмівних композиційних колодок, виготовлених із гумосуміші неконтрольованого складу, та шкідливість для здоров'я людей і довкілля продуктів їх зносу. Надано рекомендації щодо вибору чавуну для вставок у фрикційний матеріал гальмівних колодок. Показано перспективність використання вставок, виготовлених із частково графітізованого чавуну.

Ключові слова: гальмівні колодки; чавун; композиційний матеріал; властивості; теплопровідність; коефіцієнт тертя; стандартизація.

Вступ. Гальмівні колодки є одним із найвідповідальніших вузлів гальмівних систем рухомих засобів залізничного транспорту з позицій безпеки і не тільки. Результати досліджень та досвід виробництва і експлуатації на залізниці гальмівних колодок для рухомого складу, виготовлених із так званого композиційного (композитного) матеріалу у вигляді азбестової чи безазбестової гумосуміші, засвідчили, що такі колодки є токсичними, шкідливими для людей та довкілля, і за багатьма показниками поступаються традиційним чавунним колодкам [1—8 та ін.]. В процесі експлуатації гальмівних колодок ~ 80 % їх фрикційного матеріалу стирається в отруйний пил з усіма негативними від цього наслідками для здоров'я людей і довкілля. Тому до матеріалу коло-

док має бути особливо уважне відношення. За даними статті [9] в Європі (у 27 країнах Європейського Союзу і Швейцарії) до недавнього часу 75 % загальної кількості вантажних вагонів були оснащені переважно гальмівними колодками із чавуну.

Результати порівняльного аналізу властивостей і експлуатаційних характеристик чавунних і композиційних гальмівних колодок рухомого складу залізниці наведено у таблиці 1. Головний недолік гальмівних колодок із композиційного матеріалу, які експлуатують в Україні, окрім їх токсичності для людей і довкілля, полягає ще в тому, що композиційна гумосуміш має низьку теплопровідність порівняно з теплопровідністю чавуну [5; 10 та ін.]. З цієї причини композиційні колодки не забезпечують

потрібний відвід тепла із зони тертя колодки з колесом залізничного рухомого засобу. Температура колодок і коліс під час гальмування потягів може досягати 900 °С [11, с. 125]. При тому, що температура самозаймання композиційної гумосуміші за даними технічних умов на такі колодки складає (300...550) °С. Це вкрай небезпечно. Токсичні, шкідливі для людей і довкілля, пожежонебезпечні гальмівні колодки із композиційної гумосуміші в країнах Європейського Союзу зазвичай не використовують.

Враховуючи вищевикладене, для покращення відводу тепла із зони тертя колодки з колесом, фрикційні елементи композиційних колодок, які виготовлені із гумосуміші, почали оснащувати вставками з чавуну. Гальмівна композиційна колодка зі вставками є конструкцією, в якій у робочому тілі

(фрикційному елементі) з композиту присутні вставки з іншого матеріалу, найчастіше з чавуну, можливо з кераміки. Призначення вставок полягає в усуненні чи хоча б послабленні негативного впливу композиційної гумосуміші на експлуатаційні характеристики колодок. Зокрема внаслідок низької теплопровідності композиту. Модернізовані подібним способом гальмівні колодки отримали назву композиційних з чавунними вставками. Виробники оформили технічні умови (ТУ) на різні композиційні колодки з чавунними вставками. Незважаючи на публікації статей [12—13 та ін.] з відгуками щодо нібито позитивних результатів застосування на залізничному транспорті гальмівних композиційних колодок з чавунними вставками, тема ефективності таких колодок не отримала однозначного визначення. Всебічне дослідження цієї теми, узагальнення і аналіз отриманих результатів є акту-

Таблиця 1

Показники якості гальмівних колодок рухомого залізничного транспорту, виготовлених з чавуну і композиційного матеріалу

Показники	Типи колодок, стандарт, ТУ			
	Чавунні, ГОСТ 30249-97	Композиційні з сітчасто-дротовим каркасом, ТУ У 6-05495578.017-2001	Композиційні з чавунними вставками, ТУ У 39.2-35046274-059.2016	Композиційні для локомотивів ТУ У 30.2-35046274-060:2021
Хімічний склад	Регламентовано, %мас.: C = 2,7...3,4; Si = 0,7...1,0; Mn = 0,4...0,9; P = 0,4...0,9; S ≤ 0,20; Ba = 0,05...0,2; Ca = 0,05...0,15	Гумосуміш, хімічний склад і компоненти не регламентовано	Гумосуміш. Вставка чавунна. Склад чавуну і гумосуміші не регламентовано	Відсотковий склад компонентів гумосуміші не регламентовано. ¹ Хімічний склад чавуну каркасу, %мас.: C = 2,9...3,8; Si = 1,2...3,0; Mn = 0,15...0,9; P ≤ 1,0; S ≤ 0,18; Cr ≤ 0,5; Cu ≤ 1,0; Ni ≤ 0,5; Mg ≤ 0,2
Твердість за Брінеллем, НВ	217...303 229...302	1,2...3,0	композит 2,0...8,0 чавун 140...180	твердість НВ композиту 10...35; чавунного каркасу 180...260
Мікроструктура	Регламентовано дисперсність, розміри перліту, фосфідної евтектики, цементиту, графітових включень	Не регламентовано	Не регламентовано	Структура чавуну каркасу повинна мати пластинчасту форму графіту; композит — не регламентовано
Міцність при стиску, МПа	≥ 350	≥ 15	≥ 15	≥ 15
Коефіцієнт тертя	0,20...0,30	0,34...0,65	0,35...0,50	0,30...0,60
Знос, не більше	Масовий 1000...2000 г	0,13 мм	0,15 мм	0,15 мм
Густина, г/см ³	~ 7,1	Не регламентовано	1,9...2,3	Композиту 1,8...2,5
Температура самозаймання (використання), °С	Температура використання не обмежена. Матеріал не займається	550; до 300 довгостроково; до 400 короткостроково	до 350 довгостроково	до 350 довгостроково
Шкідливість матеріалу і продуктів зносу	Не шкідливі	Суттєво шкідливі	Суттєво шкідливі	Суттєво шкідливі

¹Примітка. 1. До складу композиційного матеріалу Тр130 входять наступні групи сировини, %мас.: каучук, смола 15...20; сірка та вулканізуючі агенти 1...2; волокна 15...20; наповнювачі 10...15; графіт і сульфід металів 20...25; інертні наповнювачі 18...29. 2. Міцність на злам чавунної колодки складає 127,5 кН; композиційних — не регламентовано.

Джерело: власна розробка авторів за технічними умовами України.

альною науково-технічною задачею, яка потребує вирішення.

У Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України виконано низку робіт з дослідження та порівняння властивостей і експлуатаційних характеристик гальмівних колодок, виготовлених із чавуну та з композиційної гумосуміші. Результати опубліковані у декількох монографіях і багатьох статтях [1—3; 7; 10—11; 14 та ін.]. Дослідження у зазначеному напрямі продовжуються. Аналізуючи проблему вибору матеріалу для гальмівних композиційних колодок залізничного транспорту, в тому числі й чавунних вставок, які встановлюють у фрикційний елемент колодок із композиційної гумосуміші, далі будемо користуватись результатами наших попередніх робіт.

Для виключення різного тлумачення поняття «композиційний (композитний) матеріал» підкреслюємо, що йдеться виключно про гумосуміш, основними компонентами якої є гума, каучук, азбест, барит, доломіт, вуглець технічний, сірка мелена, синтетичні смоли та волокна, інші речовини. Використання азбесту зараз заборонено. У композитному матеріалі колодок застосовують його аналоги. Після дроблення і перемішування компонентів гумосуміш витримують у спеціальних прес-формах за температури (175...180) °C під тиском (200...300) кгс/см² [3, с. 75—80]. Ключова ознака «композиційної гумосуміші», про яку йдеться, полягає в тому, що компоненти (інгредієнти), які входять до її складу, у процесі виготовлення зберігають притаманні їм хімічний склад і властивості. Зазначена механічна гумосуміш принципово відрізняється від композиційного матеріалу у вигляді сплаву. Його компоненти в процесі сплавлення не зберігають свої властивості. Композиційні сплави для гальмівних колодок виготовляють спіканням інгредієнтів за технологією порошкової металургії. Це зовсім інший матеріал, ніж композиційна гумосуміш, з якої в Україні нині виготовляють фрикційні елементи гальмівних композиційних колодок [1].

При оцінці ефективності використання на залізниці гальмівних колодок із чавуну порівняно з колодками із композиційної гумосуміші, в тому числі й обладнаних чавунними вставками, доцільно орієнтуватися на наступні показники: коефіцієнт тертя і силу тертя у зоні контакту колодок з колесами рухомих засобів, вплив на їх величини і стабільність умов експлуатації; теплопровідність матеріалу гальмівних колодок і спроможність відводу тепла із зони контакту колодки з колесом; зносостійкість фрикційного елемента колодок і тривалість їх експлуатації; вплив на утворення дефектів на поверхні кочення коліс та пов'язані з цим витрати на їх ремонт; ціну та економічну ефективність застосування колодок із різних матеріалів; наявність чи відсутність небезпечних для людей і довкілля продуктів зносу колодок; небезпечність самозаймання (таблиця 1). Вплив чавунних вставок на показники оцінки композиційних колодок потребує додаткового пояснення.

На деякі з поставлених питань можна надати відповідь невідкладно, бо висновки щодо них не ви-

кликають сумніву. Так, неспростовними є докази того, що продукти зносу у вигляді пилу композиційного матеріалу гальмівних колодок вкрай небезпечні для людей і довкілля [15—16 та ін.]. Йдеться про десятки тисяч тон токсичних викидів, як наслідок зносу колодок. Незалежно від того, чи є у складі композиційної гумосуміші азбест, чи його замінили якимось аналогом, за високих температур (800...900) °C у зоні тертя колодки з колесом такі складові композиційної гумосуміші, як гума, сірка, технічний вуглець, синтетичні смоли, волокна тощо починають розпадатися, горіти. Результат — погіршення рівня безпеки на транспорті. Схоже, що саме з цих причин виробники гальмівних колодок з композиційного матеріалу ухиляються від регламентації у ньому відсоткового вмісту компонентів та їх хімічного складу [2; 7 та ін.].

Загальновідомо також те, що гальмівні колодки із композиційної гумосуміші порівняно з чавунними колодками більшою мірою сприяють утворенню дефектів на поверхні кочення коліс залізничного транспорту [2; 3; 14; 16—17 та ін.]. В нашій статті [14] це питання проаналізовано в деталях. Підкреслимо, що дефекти на поверхні кочення коліс потребують їх видалення обточуванням і в результаті знижують тривалість експлуатації колісних пар. Витрати, пов'язані з проведенням ремонтних робіт коліс для видалення дефектів, обумовлених застосуванням композиційних гальмівних колодок, негативно відображаються на економічній ефективності діяльності залізниць.

Аналіз результатів досліджень і виробничої практики, представлених в науково-технічній літературі, свідчить, що основною причиною виникнення дефектів на поверхні кочення коліс є занадто висока температура в зоні контакту композиційної колодки з колесом транспортного засобу. Зазначене обумовлено суттєво гіршою, порівняно з чавуном, теплопровідністю композитної гумосуміші і, як наслідок, недостатнім тепловідводом із зони тертя колодки по колесу. За даними, наведеними, наприклад, у патенті RU2645857 Cl, теплопровідність гальмівної колодки з чавуну дорівнює орієнтовно 35...50 Вт/(м · К); композиційної, яка названа полімерною, — 1,3; металокерамічної — 50...55. Тобто теплопровідність композиційної гальмівної колодки в декілька разів гірша, ніж чавуну. Проблему недостатнього відводу тепла із зони тертя гальмівних композиційних колодок з колесами транспортних засобів, її негативні наслідки і можливі шляхи вирішення розглянуто в багатьох публікаціях. Деякі висновки представлені в нашій статті [10].

В доповнення до зазначеного вище підкреслимо, що теплопровідність сірого чавуну, з якого виготовляють чавунні гальмівні колодки і чавунні вставки у фрикційний елемент колодок із композиційної гумосуміші, суттєво залежить від хімічного складу чавуну, величин його вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності. З підвищенням ступеня евтектичності $S_{\text{еет}}$ і вуглецевого еквівалента $C_{\text{екв}}$, %, хімічного складу чавуну його теплопровідність збільшується. Рівняння, які відображають залежності

коефіцієнта теплопровідності чавуну λ , Вт/(м · К), від $S_{\text{еет}}$ і $C_{\text{еке}}$, мають вигляд [10]: $\lambda = 83,58 S_{\text{еет}} - 22,86$ і $\lambda = 17,97 C_{\text{еке}} - 16,85$. Коефіцієнт кореляції коефіцієнта теплопровідності λ з величинами показників $S_{\text{еет}}$ і $C_{\text{еке}}$ перевищує 0,9. Коефіцієнт теплопровідності чавуну з пластинчастим графітом, який виготовляють згідно з вимогами ДСТУ 8833:2019, може змінюватись від 38 до 60 Вт/(м · К), залежно від його марки в межах від СЧ100 до СЧ350. В технічних умовах на гальмівні композиційні колодки з чавунними вставками чи чавунним каркасом, зокрема в ТУ У 23.9-35046274-053:2015, ТУ У 30.2-35046274-059:2016, ТУ У 30.2-35046274-060:2021 й інших подібних так не відбувається. При удосконаленнях ТУ треба в кожному з них регламентувати конкретну марку чавуну для виготовлення фрикційних елементів (вставок) таких колодок.

Особливо підкреслимо, що в ТУ У 30.2-35046274-060:2021 викладені вимоги до колодок гальмівних гребневих композиційних з чавунним каркасом. В конструкції гальмівних гребневих композиційних колодок для покращення відводу тепла від колодки та поверхні колеса чавунні вставки у композиційній гумосуміші замінено на чавунний каркас колодки. Таке рішення по суті є спробою замінити чавунну гальмівну гребневу колодку марки «М», яку виготовляють для локомотивів згідно з вимогами ГОСТ 30249-97, на гальмівну гребневу композиційну колодку з чавунним каркасом. Цей напрям зміни конструкції колодки, на наше судження, є дуже небезпечним, оскільки посилює небезпеку сповзання бандажів з коліс локомотиву внаслідок підвищення температури в зоні тертя колодки з колесом через застосування композиційної колодки, виготовленої із композиційної гумосуміші, яка має низьку теплопровідність. Чавунний каркас не рятує колодку із гумосуміші від перегріву. За результатами досліджень хімічний склад чавуну, з якого виробляють каркас колодок відповідно до вимог ТУ У 30.2-35046274-060:2021, є погіршеним варіантом хімічного складу чавуну колодки «М» [10].

Результати виконаних досліджень призводять до висновку, що оптимальним матеріалом чавунних вставок для фрикційного елемента композиційних колодок є чавун, який виготовляють за вимогами ГОСТ 30249-97. Цей стандарт нині діє в Україні. На перспективу для виготовлення металевих вставок у фрикційний елемент композиційних колодок можна рекомендувати високоміцний чавун з кулястим графітом та частково графітизований чавун. Його властивості і експлуатаційні характеристики детально розглянуто в монографіях [3; 11].

В зазначеній темі детального розгляду потребує й питання впливу матеріалу гальмівних композиційних колодок на коефіцієнт їх тертя з поверхнею кочення коліс. Ця тема багатогранна. Всебічний її аналіз виходить за межі даної статті. Тому обмежимося лише представленням уявлень щодо впливу чавунних вставок у складі фрикційного елемента гальмівних композиційних колодок на механізм їх тертя з поверхнею кочення коліс.

Погляди авторів щодо впливу гальмівних колодок

на силу їх тертя по поверхні коліс залізничного транспорту в плані пошуку нових ефективних фрикційних матеріалів для виготовлення колодок викладені в опублікованих працях [1—2 та ін.]. В доповнення розглянемо механізм тертя і зносу фрикційного елемента гальмівних колодок у складі двох чи більшої кількості вставок (часток) із різних матеріалів. Зокрема на прикладі тертя по поверхні кочення колеса гальмівної колодки із композиційної гумосуміші, яка оснащена чавунними вставками.

За аналогією з гіпотезою, прийнятою у роботі [1], вважаємо, що в першому наближенні сумарна сила і коефіцієнт тертя композиційної колодки з чавунною вставкою (чавунними вставками) у її фрикційному елементі по поверхні кочення колеса транспортного

$$T_{\Sigma} = \tau_k \cdot S_k + \tau_{\text{ч}} \cdot S_{\text{ч}}; \quad f_{\Sigma} = \frac{T_{\Sigma}}{P_{\Sigma}}; \quad (1)$$

засобу дорівнюють:

де P_{Σ} — сила тиску колодки на колесо, яка направлена перпендикулярно до поверхні тертя; T_{Σ} — сумарна сила тертя колодки по поверхні колеса $f_k, f_{\text{ч}}, f_{\Sigma}$ — коефіцієнти тертя композиту, чавуну і так званий (умовний) коефіцієнт тертя колодки загалом; $S_k, S_{\text{ч}}$ — площі поверхні тертя композиційного матеріалу (гумосуміші) і металеві (чавунної) вставки у загальній площі S контакту фрикційного елемента колодки з колесом, $S_k + S_{\text{ч}} = S$, $S_k/S + S_{\text{ч}}/S = 1$; p_k і $p_{\text{ч}}$ — величини питомої сили тиску на поверхні композиту і чавуну; τ_k і $\tau_{\text{ч}}$ — питомі сили тертя на ділянках композиту і чавуну у фрикційному елементі, $\tau_k = f_k \cdot p_k$, $\tau_{\text{ч}} = f_{\text{ч}} \cdot p_{\text{ч}}$.

В разі, коли питома сила тиску p на кожен ділянку фрикційного елемента колодки однакова, то $P_{\Sigma} = p(S_k + S_{\text{ч}}) = pS$. Але у загальному випадку коефіцієнти тертя на ділянках композиту f_k і чавуну $f_{\text{ч}}$ можуть мати різні величини, як це нерідко відбувається в реальності. Різні величини може мати і питомий тиск на композит і на чавун у фрикційному елементі. Тоді сумарна сила тертя гальмівної колодки по колесу визначається за формулою (2):

$$T_{\Sigma} = f_k \cdot p_k \cdot S_k + f_{\text{ч}} \cdot p_{\text{ч}} \cdot S_{\text{ч}}. \quad (2)$$

Якщо сумарна сила тиску P_{Σ} рівномірно розподіляється по усій площі фрикційного елемента колодки, то питома сила тиску p є однаковою на обох його ділянках і дорівнює $p = P_{\Sigma}/S$. На практиці щільність, деформованість та зносостійкість композиційної гумосуміші й чавуну суттєво різні. Внаслідок цих обставин питома сила тиску на композит і чавун у фрикційному елементі композиту можуть бути різними.

Композитна гумосуміш у колодках вважається більш зносостійкою ніж чавун. Тому можна очікувати, що при однакових температурно-силових умовах у зоні тертя гальмівної композиційної колодки, оснащеної чавунними вставками, по поверхні колеса, в першу чергу, швидше і більше будуть зношуватись чавунні вставки. При критичному зносі чавунних вставок експлуатація гальмівної колодки закінчується.

Виходить, що у розглянутих умовах тривалість експлуатації гальмівних композиційних колодок з чавунними вставками визначається зносостійкістю чавуну вставок. Чавунні колодки виготовляють зазвичай з більш якісного чавуну, ніж чавунні вставки для колодок із композиційної гумосуміші. То за викладеною логікою тривалість експлуатації композиційної колодки з чавунними вставками не може бути більшою, ніж тривалість експлуатації чавунних колодок. При критичній величині зносу чавунної вставки замінюють колодку.

В розглянутій вище схемі приймалося априорі, що тертя на ділянках композитної гумосуміші і чавунних вставок відбувалося незалежно, без взаємовпливу цих складових фрикційного елемента гальмівної колодки. Не враховувалися також зміни і вплив температурного режиму у зоні контакту гальмівної колодки з колесом, обумовлені наявністю металевих вставок у фрикційному елементі колодки на коефіцієнти тертя та зносостійкість матеріалів. При тому, що композиційні колодки оснащують чавунними вставками заради покращення тепловідводу із зони тертя.

Відповідно до зазначеного є підстави вважати, що зносостійкий композит у фрикційному елементі колодки стримує знос чавунних вставок. Зі свого боку чавунні вставки покращують відвід тепла та запобігають надмірному зростанню температури у зоні контакту колодки з колесом рухомого транспорту. Зміни температури своєю чергою впливають на коефіцієнти тертя f_K і f_C та величину сумарної сили тертя T_s колодки по поверхні колеса, що відображено в рівнянні (2). Оптимізувати розглянутий процес з позицій забезпечення необхідної сили тертя колодки з колесом та її гальмівної спроможності й максимально можливої зносостійкості можна шляхом регулювання величини тиску колодки на колесо і вибором розмірів чавунних вставок у фрикційному елементі композиційних колодок.

Коли коефіцієнт тертя f_K композитного матеріалу колодки по поверхні колеса у процесі тертя вищий, ніж коефіцієнт тертя f_C чавунної вставки, а зносостійкість композиту краща, тобто композит менше зношується, ніж чавун при однаковому навантаженні, механізм тертя складніший і відбувається, схоже, за наступною умовною схемою.

На початку гальмування питомий тиск на ділянках композиту і чавунної вставки однаковий. При цьому внаслідок гіршої зносостійкості чавуну, ніж композиту, чавунна вставка буде прагнути зношуватись і зменшувати свою товщину швидше, ніж таке відбувається на ділянці композиту єдиного фрикційного елемента колодки. Але в подальшому завдяки здатності системи «гальмівна колодка — колесо» до певного саморегулювання силового навантаження ділянок композиту і чавуну в загальному фрикційному елементі під час приробітки колодки і стабілізації процесу тертя відбувається перерозподіл тиску на зазначених ділянках фрикційного елемента для вирівнювання швидкості зносу обох матеріалів. На ділянках чавунної вставки питомий тиск p_C та її знос зменшуються, а на ділянці композиту питомий тиск p_K , сила тер-

тя τ_K і знос абразивного матеріалу збільшуються. При тому, що сила P_s тиску колодки на колесо залишиться незмінною. В результаті знос загалом гальмівної композиційної колодки з чавунними вставками прискориться порівняно зі швидкістю зносу колодки із композиту без чавунних вставок.

Така спрощена, умовна схема саморегулювання механізму тертя і зносу композиційної колодки з чавунними вставками не враховує вплив температурно-силового режиму тертя колодки з колесом на величини коефіцієнтів тертя f_K і f_C , які, скоріш за все, будуть змінюватися залежно від тиску на колодку і температури у зоні тертя. Ці залежності, як показано в роботі [18], неоднозначні і дуже складні. Але навіть представлена спрощена схема свідчить, що оснащення фрикційного елемента чавунними вставками для покращення тепловідводу із зони тертя композиційної колодки з колесом може прискорити знос композиту у фрикційному елементі колодки, а відповідно й скоротити тривалість експлуатації колодки.

Додатково зазначимо, що під впливом високої температури, тиску і тертя відбувається старіння, деструкція, руйнування початкової структури і властивостей композиційної гумосуміші гальмівних колодок. Зазначене призводить до зменшення коефіцієнта тертя композиту по поверхні сталевих коліс рухомого залізничного транспорту. Чавунні вставки у композиційних колодках, як й колодки з чавуну, майже не змінюють свої властивості і експлуатаційні характеристики під впливом вказаних змін температурно-силових умов застосування. Циклічний характер зміни температури в зоні тертя гальмівної колодки з колесом рухомого транспорту може призвести до виникнення значного градієнту температур у приповерхневому шарі колеса і початку в ньому фазових перетворень. Ці процеси детально досліджено авторами робіт [19 та ін.].

Оснащення композиційних гальмівних колодок чавунними вставками не позбавляють їх від схильності сприяти виникненню дефектів на поверхні коліс. Більше того, стики чавунних вставок з композитом у фрикційному елементі колодок створюють додаткові загрози пошкодження поверхні кочення коліс. Проблема токсичності продуктів зносу гальмівних композиційних колодок також не зникає при оснащенні їх фрикційного елемента із гумосуміші чавунними вставками. За причини шкідливості для здоров'я людей і навколишнього середовища гальмівні колодки із гумосуміші нерегламентованого складу в країнах Західної Європи не використовують [5; 9].

Оцінка економічних та екологічних аспектів використання гальмівних колодок з чавуну та з композиційного матеріалу, у тому числі з чавунними вставками, свідчить, що ситуація, коли композиційні колодки в Україні були удвічі дешевші за чавунні, залишилася у минулому. Нині вартість композиційних гальмівних колодок з чавунними вставками, зокрема, перевищує вартість чавунних колодок більш ніж у двічі. При тому, що оснащення колодок із гумосуміші чавунними вставками майже не посилює їх безпеку, термостійкість і не вирішує проблему посиленого по-

шкодження поверхні кочення коліс з усіма негативними наслідками від цього.

Висновки

1. Чавунні вставки у складі фрикційного елемента гальмівних колодок, виготовлених із композиційної гумосуміші, дещо покращують відвід тепла із зони їх тертя з колесами рухомого залізничного транспорту. Але таке рішення не є кардинальним з позиції компенсації негативних явищ, що виникають у процесі експлуатації композиційних колодок і обумовлені суттєвим підвищенням температури у контактній зоні в процесі їх тертя по поверхні кочення коліс.

2. Колодки гребневі композиційні з чавунним каркасом, які виготовляють згідно з ТУ У 30.2-35046274-060:2021, фактично є погіршеним варіантом чавунних колодок марки «М», які виготовляють відповідно до вимог ГОСТ 30249-97. Внаслідок підвищення температури в зоні застосування зазначених гальмівних колодок із композитної гумосуміші, навіть якщо їх каркас виготовлено із чавуну, температура в зоні тертя колодки з колесом суттєво підвищується. Чавунний каркас не рятує композиційні колодки від цього негативного ефекту. Посилюється тенденція щодо сповзання бандажів з коліс через перегрів. Застосування таких колодок особливо небезпечно на колесах локомотивів.

3. Оптимальним матеріалом чавунних вставок для фрикційного елемента композиційних гальмівних колодок є чавун, який виготовляють за вимогами до його хімічного складу, структури і властивостей відповідно до ГОСТ 30249-97. В перспективі можна очікувати для виготовлення вставок використання високоміцного чавуну з кулястим графітом чи напівграфітизованого чавуну.

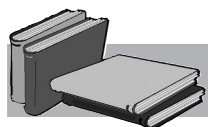
4. Оснащення гальмівних колодок із композиційної гумосуміші чавунними вставками не рятує колеса рухомого залізничного транспорту від посиленого пошкодження їх поверхні кочення. Основною причиною виникнення дефектів на поверхні кочення коліс є їх

термічні пошкодження, викликані занадто високою температурою в зоні контакту композиційних колодок з колесом. Додаткові витрати на виконання ремонту пошкодженої поверхні кочення коліс суттєво знижують ефективність застосування гальмівних композиційних колодок незалежно від наявності чи відсутності чавунних вставок у їх фрикційному елементі.

5. Продукти зносу гальмівних колодок, виготовлених із будь-якого матеріалу, мають бути безпечними для людей і довкілля. Це обов'язкова, безальтернативна вимога. Але гальмівні колодки із композиційної гумосуміші не відповідають цій вимозі. Чавунні вставки не позбавляють гальмівні композиційні колодки із гумосуміші від їх токсичності, від шкідливості для здоров'я людей і довкілля продуктів зносу композиту у вигляді отруйного пилу. Саме з цієї причини такі колодки не використовують у країнах ЄС навіть на вантажних вагонах. Композиційні колодки із гумосуміші не мають перспективи розвитку.

6. Внаслідок значно гіршої, ніж у чавуну, теплопровідності композиційного матеріалу (гумосуміші), суттєво погіршуються експлуатаційні властивості виготовлених з нього гальмівних колодок і безпека на транспорті. Зокрема виникає небезпека ослаблення і сповзання бандажів з коліс рухомих засобів. Оснащення композиційних колодок чавунними вставками не виключає небезпеки перегріву зони тертя колодок з колесами залізничного транспорту.

7. Для забезпечення легітимності технічних умов на гальмівні композиційні колодки з чавунними вставками у фрикційному елементі чи без вставок, також колодок з чавунним каркасом необхідно відповідно до вимог законодавства України, зокрема ГОСТ 2.114-95, регламентувати в них відсотковий вміст і хімічний склад компонентів композитної гумосуміші, чавунних вставок і чавунного каркасу та їх властивості. Нелегітимність технічних умов призводить до нелегітимності виготовленої продукції.

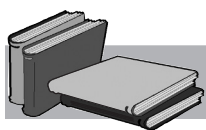


ЛІТЕРАТУРА

1. Сіренко К. А., Мазур В. Л. Аналіз показників якості гальмівних колодок з чавуну і багатокомпонентних композиційних матеріалів. *Метал та лиття України*. 2024. Т. 32. № 1 (336). С. 40—49. <https://doi.org/10.15407/steelcast2024.01.005>
2. Мазур В. Л., Найдек В. Л., Попов Є. С. Порівняння чавунних і композиційних з чавунними вставками гальмових колодок для рухомого складу залізниці. *Метал та лиття України*. 2021. Т. 29. № 2 (325). С. 80—89. <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.02.080>
3. Неижко И. Г., Найдек В. Л., Гаврилюк В. П. Тормозные колодки железнодорожного транспорта. Киев: Физ.-технол. ин-т металлов и сплавов НАН Украины, 2009. 121 с.
4. Ямшинський М. М., Назаренко В. С., Кравченко К. О. Аналіз гальмівних колодок та шляхи оцінки їх перспективних конструкцій. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2015. № 1 (218). С. 204—209.
5. Мурадян Л. А., Шапошник В. Ю., Винокурова С. В. Пути развития, тенденции и перспективы дальнейшего совершенствования тормозной колодки рельсового подвижного состава. *Вагонный парк*. 2015. № 5—6 (98—99). С. 32—34.
6. Галай Э. И., Рудов П. К., Галай И. Э., Сидорович О. А. Тормозные колодки для электропоездов: чугунные или композиционные? 2005. URL: <http://scbist.com/xx2/43779-06-2005-tormoznye-kolodki-dlya-elektropoezdov-chugunnye-ili-kompozicionnye.html> (дата звернення: 29.01.2024).

7. Попов Е. С., Шинский О. И. Анализ показателей качества колодок тормозных чугунных и композиционных для железнодорожного подвижного состава. *Литье и металлургия*. 2021. № 1. С. 27—37. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-27-37>
8. Бабаев А. М., Мурадян Л. А., Винокурова С. В. О тормозных колодках дорог Украины. *Вагоны и вагонное хозяйство*. 2010. № 4. С. 43—44.
9. Cantone L., Ottati A. Modelling of Friction Coefficient for Shoes Type LL By Means of polynomial Fitting. *The Open Transportation Journal*. 2018. Vol. 12. P. 114—127. <https://doi.org/10.2174/18744478018120100114>
10. Сіренко К. А., Мазур В. Л. Оцінка теплопровідності виливків із сірого чавуну з пластинчастим графітом. *Процеси ливарства*. 2024. № 2 (156). С. 56—64. <https://doi.org/10.15407/plit2024.02.056>
11. Неижко И. Г. Термическая обработка чугуна. Киев: Наукова думка, 1992. 208 с.
12. Дубравін Ю. Ф., Пилипенко А. Є. Застосування композиційних гальмових колодок з чавунними вставками для колісних пар з бандажем. *Вісник Східноукраїнського Національного університету імені Володимира Даля*. 2017. № 4 (234). С. 182—184. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VSUNU_2017_4_37 (дата звернення: 17.09.2024).
13. Коснарев А. С., Поль В. Б., Попов В. Ю., Котышев А. А., Маторин А. С., Ушаков В. Н., Мякишев А. К. Локомотивные тормозные колодки повышенного качества. *Литейное производство*. 1999. № 11. С. 32—33.
14. Сіренко К. А., Мазур В. Л. Аналіз впливу матеріалу гальмівних колодок на утворення дефектів на поверхні кочення коліс залізничного транспорту. *Метал та ливарство України*. 2024. Т. 32. № 2 (337). С. 57—63. <https://doi.org/10.15407/steelcast2024.02.008>
15. Шафран Л. М., Мазур В. Л., Большой Д. В., Пихтеева О. Г., Третьякова О. В., Потапов Є. А., Третьяков О. М., Михалькова С. Г. Токсиколого-гігієнічні та екологічні аспекти безпеки гальмівних систем рухомого складу залізничного транспорту. Частина 1. Міграція шкідливих речовин у довкілля. *Актуальні проблеми транспортної медицини*. 2022. № 1 (67). С. 7—18. Шафран Л. М., Мазур В. Л., Большой Д. В., Пихтеева О. Г., Третьякова О. В., Потапов Є. А., Третьяков О. М., Пихтеев Д. М. Токсиколого-гігієнічні та екологічні аспекти безпеки гальмівних систем рухомого складу залізничного транспорту. Частина 2. Забруднення довкілля важкими металами та азбестом. *Актуальні проблеми транспортної медицини*. 2022. № 2 (68). С. 15—26.
16. Равлюк В. Г., Равлюк М. Г. Екологічні збитки довкіллю від застосування композиційних гальмівних колодок у вагонах. *Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика: тези доповідей IV Всеукраїнської науково-практичної конференції*. (Маріуполь, 15—17 травня, 2018 р.). Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2018. С. 112—113.
17. Ловська А., Равлюк В. Виявлення причин утворення поверхневих дефектів коліс вагонів, обладнаних композиційними колодками. *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій: Серія «Транспортні системи і технології»*. 2022. Вип. 40. С. 102—120. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-9>
18. Xiao X., Yin Y., Bao J., Lu L., Feng X. Review on the friction and wear of brake materials. *Advances in Mechanical Engineering*. 2016. № 8(5). P. 1—10. <https://doi.org/10.1177/1687814016647300>
19. Вакуленко І. О., Плітченко С. О., Перков О. М. Аналіз матеріалу гальмівних колодок рухомого складу. *Збірник тез Всеукраїнської науково-технічної конференції «Наука і металургія»*. 14—16 листопада. Дніпро, 2023. С. 50. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-conferens>

Надійшла 20.09.2024



REFERENCES

1. Sirenko, K. A., & Mazur, V. L. (2024). Analiz pokaznykiv yakosti halmivnykh kolodok z chavunu i bahatokomponentnykh kompozytsiynykh materialiv [Analysis of quality indicators for brake pads made of cast iron and multicomponent composite materials]. *Metal and Casting of Ukraine*, 32(1(336)), 40—49. <https://doi.org/10.15407/steelcast2024.01.005> [in Ukrainian].
2. Mazur, V. L., Naidek, V. L., & Popov, Ye. S. (2021). Porivniannia chavunnykh i kompozytsiynykh z chavunnymy vstavkami halmovnykh kolodok dlia rukhomoho skladu zaliznytsi [Comparison of cast-iron and composite brake pads with cast-iron inserts for rolling stock of railways]. *Metal and Casting of Ukraine*, 29(2(325)), 80—89. <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.02.080> [in Ukrainian].
3. Neizhko, I. G., Naydek, V. L., & Gavrilyuk, V. P. (2009). *Tormoznyie kolodki zheleznodorozhnogo transporta*. [Railway brake pads]. PTIMA NAS of Ukraine [in Russian].
4. Yamshynskiy, M. M., Nazarenko, V. S., & Kravchenko, K. O. (2015). Analiz halmivnykh kolodok ta shliakhy otsinky yikh perspektyvnykh konstruktii [Analysis of brake pads and ways to evaluate their promising designs]. *Visnyk of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 1(218), 204—209 [in Ukrainian].
5. Muradyan, L. A., Shaposhnik, V. Yu., & Vinokurova, S. V. (2015). Puti razvitiya, tendencii i perspektivy dal'nejshego sovershenstvovaniya tormoznoj kolodki rel'sovogo podvizhnogo sostava [Ways of development, tendencies and prospects for further improvement of the brake pad of railway rolling stock]. *Wagon fleet*, 5—6(98—99), 32—34 [in Russian].

6. Galaj, E. I., Rudov, P. K., Galaj, I. E., & Sidorovich, O. A. (2005). *Tормозные колодки для электропоездов: чугунные или композитные?* [Brake pads for electric trains: cast iron or composite?] <http://scbist.com/xx2/43779-06-2005-tormoznye-kolodki-dlya-elektropoezdov-chugunnye-ili-kompozicionnye.html> [in Russian].
7. Popov, E. S., & Shinsky, O. I. (2021). Analiz pokazatelei kachestva kolodok tormoznykh chuhunnykh y kompozytsyonnykh dlia zheleznodorozhnoho podvyzhnoho sostava [Performance quality analysis of brake iron and composite pads for railway rolling composition]. *Foundry production and metallurgy*, (1), 27–37. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-27-37> [in Russian].
8. Babaev, A. M., Muradyan, L. A., & Vinokurova, S. V. (2010). O tormoznykh kolodkakh dorog Ukrainyi [About brake pads of roads of Ukraine]. *Wagons and wagon facilities*, (4), 43–44 [in Russian].
9. Cantone L., & Ottati A. (2018.) Modelling of Friction Coefficient for Shoes Type LL By Means of polynomial Fitting. *The Open Transportation Journal*, 12, 114–127. <https://doi.org/10.2174/18744478018120100114>
10. Sirenko, K. A., & Mazur, V. L. (2024). Otsinka teploprovodnosti vylivkiv iz siroho chavunu z plastynchastym hraitom [Assessment of thermal conductivity of grey cast iron castings with lamellar graphite]. *Casting processes*, 2(156), 56–64. <https://doi.org/10.15407/plit2024.02.056> [in Ukrainian].
11. Neizhko, I. G. (1992). *Termycheskaia obrabotka chuhuna* [Heat treatment of cast iron]. *Naukova dumka* [in Russian].
12. Dubravin, Yu. F., & Pylypenko, A. Ye. (2017). Zastosuvannia kompozytsiinykh halmovykh kolodok z chavunnymy vstavkamy dlia kolisnykh par z bandazhem [Application of composite brake pads with cast iron inserts for wheel sets with a band]. *Visnyk of the Eastern Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl*, 4(234), 182–184. http://nbuv.gov.ua/UJRN/VISUNU_2017_4_37 [in Ukrainian].
13. Kosnarev, A. S., Pol, V. B., Popov, V. Yu., Kotyashev, A. A., Matorin, A. S., Ushakov, V. N., & Myakishev, A. K. (1999). Lokomotivnyie tormoznyie kolodki povyshennogo kachestva [Locomotive brake pads of increased quality]. *Foundry Production*, 11, 32–33 [in Russian].
14. Sirenko, K. A., & Mazur, V. L. (2024). Analiz vplyvu materialu halmivnykh kolodok na utvorennia defektiv na poverkhni kochennia kolis zaliznychnoho transportu [Analysis of the influence of brake pad material on the formation of defects on the rolling surface of railway wheels]. *Metal and Casting of Ukraine*, 32(2(337)), 57–63. <https://doi.org/10.15407/steelcast2024.02.008> [in Ukrainian].
15. Shafran, L. M., Mazur, V. L., Bolshoy, D. V., Pykhtieva, O. G., Tretyakova, O. V., Potapov, Ye. A., Tretyakov, A. M., & Mikhalkova, S. G. (2022). Toksykolohe-hihiienichni ta ekolohichni aspekty bezpeky halmivnykh system rukhomoho skladu zaliznychnoho transportu. Chastyna 1. Mihratsiia shkidlyvykh rehovyn u dovkillia [Toxicological-hygienic and ecological aspects of safety of rolling stock braking systems of railway transport. Part 1. Migration of toxicants into the environment]. *Actual problems of transport medicine*, 1(67), 7–18. Shafran, L. M., Mazur, V. L., Bolshoy, D. V., Pykhtieva, O. G., Tretyakova, O. V., Potapov, Ye. A., Tretyakov, O. M., & Pykhtiev, D. M. (2022). Toksykolohe-hihiienichni ta ekolohichni aspekty bezpeky halmivnykh system rukhomoho skladu zaliznychnoho transportu. Chastyna 2. Zabrudnennia dovkillia vazhkymy metalamy ta azbestom [Toxicological-hygienic and ecological aspects of safety of rolling stock braking systems of railway transport. Part 2. Pollution by heavy metals and asbestos]. *Actual Problems of Transport Medicine*, 2(68), 15–26 [in Ukrainian].
16. Ravlyuk, V. G., & Ravlyuk, M. G. (2018). Ekolohichni zbytky dovkilliu vid zastosuvannia kompozytsiinykh halmivnykh kolodok u vahonakh. Problemy enerhoresursozberezhennia v promyslovomu rehioni [Environmental damage caused by the use of composite brake pads in railway cars. Problems of energy and resource saving in an industrial region]. *Science and Practice: abstracts of the IV All-Ukrainian Scientific and Practical Conference* (Mariupol, 15–17 May, 2018). Mariupol: SHEI “PSTU”, 112–113 [in Ukrainian].
17. Lovska, A., & Ravlyuk, V. (2022). Vyiavlennia prychyn utvorennia poverkhnevnykh defektiv kolis vahoniv, obladnanykh kompozytsiinykh kolodkamy [Identification of the causes of surface defects of wheels of cars equipped with composite pads]. *Transport Systems and Technologies*, (40), 102–120. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-9> [in Ukrainian].
18. Xiao, X., Yin, Y., Bao, J., Lu, L., & Feng, X. (2016). Review on the friction and wear of brake materials. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(5), 1–10. <https://doi.org/10.1177/1687814016647300>
19. Vakulenko, I. O., Plitchenko, S. O., & Perkov, O. M. (2023). Analiz materialu halmivnykh kolodok rukhomoho skladu [Analysis of the material of brake pads of rolling stock]. Collection of abstracts of the All-Ukrainian Scientific and Technical Conference “Science and Metallurgy”. 14–16 November. Dnipro, p. 50. DOI: <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-conferens> [in Ukrainian].

Received 20.09.2024

Summary

K.A. Sirenko, Junior Researcher, e-mail: thermoexp.metal@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0003-2613-8094>

V.L. Mazur, Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Dr. Sci. (Engin.),
Professor, Chief Researcher, e-mail: prof.vlm@ukr.net,
<https://orcid.org/0000-0001-8970-5389>

*Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy
of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)*

Selection of Cast Iron for Inserts in the Friction Element of Brake Pads for Rolling Stock

The article reviews publications on the evaluation of the effectiveness of materials used for the manufacture of brake pads for railway rolling stock. The chemical composition, mechanical properties and performance characteristics of cast iron and composite brake pads made of rubber compound, including those equipped with cast iron inserts, are compared. It is shown that the chemical composition and mechanical properties of cast iron brake pads meet the requirements regulated in standards, in particular, in GOST 30249-97, which is currently in force in Ukraine. Composite brake pads are manufactured according to specifications that do not regulate the percentage of composite rubber compound components and their chemical composition, which is a violation of GOST 2.114-95. This excludes the possibility of controlling these main indicators of the pads' quality by their consumers. It has been confirmed that the main disadvantage of composite brake pads is the significantly low thermal conductivity of the composite rubber compound compared to the thermal conductivity of cast iron. Due to the low thermal conductivity of the friction element of brake pads made of this composite material and, as a result, insufficient heat dissipation from the friction zone between the pad and the wheel during train braking, the temperature in this zone can reach 900 °C. This is despite the fact that the self-ignition temperature of the composite rubber compound is (300...550) °C according to the technical specifications for composite pads. An increase in temperature changes the friction conditions of the pads on the rolling surface of the wheels and impairs the wear resistance of the pads. To mitigate the negative impact of the low thermal conductivity of the composite rubber compound, the friction element of composite brake pads is equipped with inserts made of cast iron, which has a relatively high thermal conductivity. Such a solution has a positive effect on the temperature regime of the pads and wheels, but does not provide a radical improvement in heat removal from the contact zone of brake pads with the wheels of moving vehicles. The mechanism of influence of the temperature in the contact zone of the pad with the wheel on the occurrence of defects in the rolling surface of wheels is considered. The toxicity of brake composite pads made of uncontrolled rubber compounds and the harmfulness of their wear products to human health and the environment are noted. Recommendations for the selection of cast iron for inserts in the friction material of brake pads are given. The article shows the prospects of using inserts made of partially graphitised cast iron.

Keywords

Brake pads; cast iron; composite material; properties; thermal conductivity; friction coefficient; standardisation.