

УДК 629.4

АНАЛІЗ ГАЛЬМІВНИХ КОЛОДОК ТА ШЛЯХИ ОЦІНКИ ЇХ ПЕРСПЕКТИВНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Ямшинський М.М., Назаренко В.С., Кравченко К.О.

ANALYSIS OF THE BRAKE PADS AND THE WAYS OF ASSESSING THEIR PERSPECTIVE DESIGNS

Yamshinsky M., Nazarenko V., Kravchenko K.

У даній статті представлено результати аналізу фрикційних елементів гальмівної системи. Встановлено, що гальмівні колодки поділяють на категорії за типом матеріалу, з якого вони зроблені, і формою виконання. Відповідно до першої випускаються три види колодок: чавунні стандартні, композиційні та чавунні з підвищеним вмістом фосфору (фосфористий). По результатам аналізу оцінено існуючі та перспективні фрикційні матеріали для виготовлення гальмівних колодок. До перспективних матеріалів слід віднести: титанові сплави, Fe-Cu-Cr-графітові спечені матеріали, SiC фільтри, чавунні колодки, що містять пінокераміку. На основі проведеного аналізу матеріалів і характеристик фрикційних елементів гальмівних систем, розроблено цільову функцію, яка дозволяє підбирати найбільш вигідний варіант конструктивного виконання гальмівної колодки для конкретного рухомого складу. Фізичне значення цільової функції полягає в наступному: відведення тепла під час гальмування і оптимізація коефіцієнту тертя повинні наближатися до максимуму, в той час як знос пари «колесо-колодка», екологічна безпека, собівартість повинні наближатися до мінімуму.

Ключові слова: гальмівні чавунні колодки, гальмівні композиційні колодки, пінокераміка, карбід-кремнієві фільтри, теплопровідність, зносостійкість.

Постановка проблеми. Надійна робота гальмівного обладнання дозволяє підвищити швидкість та безпеку руху транспортного засобу. Використання передових технологій, особливо в гальмівній системі, сприяє ресурсозбереженню при експлуатації рухомого складу. Від матеріалу і конструкційних особливостей гальмівних колодок в значній мірі залежить ефективність роботи всієї гальмівної системи. Проблема досягнення максимального ефекту полягає в суперечливості вимог, яким повинні відповідати конструктивні елементи гальм. Наприклад, одним з основних параметрів фрикційних елементів гальмівної системи є коефіцієнт тертя - використання фрикційних матеріалів з високим коефіцієнтом

тертя може приводити до підвищеного зносу трибоконтакту елементів взаємодії, а з низьким – до зниження ефективності гальмування, збільшення величини гальмівного шляху. Відповідно при проектуванні, виготовленні та експлуатації необхідно проводити оцінку найвигіднішого матеріалу й конструкції з урахуванням економічної ефективності та зменшення ризику виникнення аварійної ситуації від ненадійної роботи гальм.

Мета. Для якісної оцінки перспективних конструкцій фрикційних елементів гальмівної системи та прогнозування найвигіднішої з них необхідна цільова функція по отриманню оптимального варіанту для конкретного рухомого складу, розробка якої повинна бути отримана на основі аналізу матеріалів та характеристик фрикційних елементів гальмівних систем.

Аналіз досліджень. Гальмівні колодки поділяють на категорії за типом матеріалу, з якого вони зроблені, і формою виконання. Відповідно до першої випускаються три види колодок: чавунні стандартні, композиційні та чавунні з підвищеним вмістом фосфору (фосфористий), а відповідно до другої: безгребневі, гребневі та секційні. Крім того, в дискових гальмах використовуються спеціальні накладки з чавуну [1].

Чавунні стандартні колодки застосовують на пасажирських вагонах, які обертаються зі швидкостями до 120 км/год, і локомотивах. Такі колодки мають суттєво нестабільний, коефіцієнт тертя, що знижується зі зростанням швидкості. Це, зокрема, призводить до необхідності застосування на швидкісному рухомому складі регуляторів сил натиснення колодок залежно від швидкості руху. Крім того, чавунні колодки швидко зношуються, що вимагає великого обсягу робіт по заміні і регулюванню важільних передач. До переваг цих фрикційних елементів відносяться гарне відведення тепла, що виді-

ляється при гальмуванні і відсутність впливу вологи на коефіцієнт тертя.

Основною причиною, що ускладнює дослідження теплопровідності чавуна полягає в наявності в чавуні графітових включень. Але в той самий час саме дослідження графітної фази є дуже важливим моментом для того щоб зрозуміти таке явище як перенос тепла в чавуні. Навіть при однаковому хімічному складі теплопровідність сірого чавуна може бути в 2 рази вище ніж теплопровідність чавуну з кулястим графітом. Вміст домішок (Si, Mn, S, P і т.д.) в залежності від форми графітних включень на теплопровідність впливають в незначній мірі. В чавуні з кулястим графітом основним теплопровідним компонентом є металева основа, а в чавуні з пластинчатим графітом провідником тепла є графіт, що міститься у включеннях. Тому, можна стверджувати, що в чавуні з кулястим графітом при однаковій формі графітових включень і однаковому типі металічної основи, домішки знижують теплопровідність. У відношенні інших типів чавуну, особливо з пластинчатим графітом ця закономірність не працює [2].

В роботі [2] вважається, що вплив елементів на теплопровідність чавуну слід оцінювати з позиції їх впливу на ступінь графітизації сплаву, структуру і дисперсність графітної фази. Наприклад, елементи що підвищують ступінь графітизації сприяли підвищенню теплопровідності чавуну і навпаки. Тому, з підвищенням вмісту кремнію теплопровідність чавуну суттєво знижується якщо ступінь графітизації залишається без змін.

Марганець, а особливо фосфор і нікель знижують характеристики теплопровідності внаслідок утворення твердих розчинів і виділення фосфатів.

Алюміній також знижує теплопровідність. Але в залежності від зміни кількості графіту алюміній може по різному впливати на теплопровідність.

Мідь в межах до 1% зменшує провідність чавуну з інтенсивністю приблизно в 2 рази менше, ніж кремній.

Хром, молібден, вольфрам і кобальт трохи підвищують теплопровідність чавуну.

Ванадій при вмісті до 0,12% не впливає на провідність чавуну.

Утворення в металічній основі чавуну твердих розчинів знижує теплопровідність. Також не викликає сумніву і той факт, що перлітизація металічної основи знижує теплопровідність чавуну.

Властивості будь-якого металу визначаються його мікроструктурою, яка при одному й тому ж хімічному складі може бути різною в залежності від характеру кристалізації і наступній перекристалізації при охолодженні чи проведенні термічної обробки. Чавуни відносяться до тих сплавів, які дуже чутливі до умов кристалізації, тверднення виливків (гальмівних колодок). В технічних умовах на гальмівні колодки хімічний склад чавуну визначається як один з основних і найважливіших показників, згідно з яким визначається відповідність якості колодок прийнятих технічними умовами.

Другим показником цього ж значення є твердість чавуну колодок, яка залежить від мікроструктури чавуну. Така послідовність цих критеріїв визначається тим, що вилівки гальмівних колодок заданими всіх нормативних актів не підлягають термообробці, а використовуються в литому стані.

Використання чавуну в якості фрикційного матеріалу для гальмівних колодок стало можливим завдяки його антифрикційним характеристикам, наявність графіту в структурі чавуну відіграє роль змазки.

Кремній впливає на кристалізацію сірого чавуну як графітизатор при твердненні вилівки без вільного і евтектичного цементиту, без відбілення чавуну. В цьому і є його позитивний вплив. Але при охолодженні вилівка в районі температур 750 – 600 °C відбувається евтектоїдне перетворення аустеніту і друга стадія графітизації, під час якої в структурі чавуну збільшується кількість небажаної феритної складової, що як наслідок знижує твердість чавуну і його зносостійкість. Тому вміст кремнію має бути обмежений верхньою і нижньою границями [2].

З метою зменшення феритної складової в структурі чавуну та підвищення його твердості і зносостійкості чавун можуть легувати елементами, які сприяють перлітизації структури або проводити прискорене охолодження колодок після вибивки їх із форм при температурі нижче 750 - 800°C. Легування сірого графітизованого чавуну такими елементами як хром, марганець і молібден також сприяють перлітизації так само, як і зниження в ньому кремнію. Але виготовлення гальмівних колодок з таких чавунів ускладнюється можливістю отримання відбілу чавуну колодок при незначній зміні в технології або хімічному складі.

Найбільше застосування при виробництві гальмівних колодок отримав фосфористий чавун. Особливістю фосфору як легувального елемента є можливість регулювання кількості в чавуні фосфідів заліза (Fe₃P) пропорційно кількості в чавуні фосфору. Чим вищий в чавуні вміст фосфору, тим вище зносостійкість чавуну і його коефіцієнт тертя.

Композиційні гальмівні колодки застосовують на всіх вантажних, а також на пасажирських вагонах, які експлуатуються при швидкостях понад 120 км/год. Їх виготовляють за певною технологією з асбокаучукових матеріалів з додаванням бариту, сажі та вулканізуючого складу методом напесовки на металевий каркас. Вони в 3-5 разів більше зносостійкі, ніж чавунні, що відповідно знижує обсяг робіт по заміні і регулюванню важільних передач, і володіють підвищеними стабільністю і величиною коефіцієнта тертя щодо швидкості руху. Це збільшує гальмівну ефективність поїздів, полегшує гальмівну важільну передачу і зменшує витрату стисненого повітря, витраченого на гальмування завдяки зниженим зусиллям, що розвиваються в ній, поліпшує керованість поїздів і невичерпність їх гальмівних систем.

Також композиційні колодки легше чавунних і їх вартість також нижче. Завдяки меншій масі (приблизно в 3 рази) і меншій частоті зміни колодок (в 3 – 5 раз) полегшує трудоемність обслуговування тормозної системи вагона. Також слід відмітити, що композиційні колодки характеризуються більш високим коефіцієнтом тертя і менше залежать від швидкості гальмування. Композиційні гальмівні колодки забезпечують більш плавне й тихе гальмування. Такими є основні переваги композиційних гальмівних колодок.

До недоліків цих колодок відносяться поганий відвід тепла і, як наслідок, несприятливі температурні режими на поверхні кочення коліс, що викликають їх ушкодження у вигляді наварів, зрушень металу, мікротріщин і т.д. (рис. 1). Їх не застосовують на бандажних (локомотивних) колесах через перегрів, ослаблення і можливого сповзання бандажа. Крім цього, при зволоженні, особливо в зимовий період через заметілі і снігопади, композиційні колодки зволожуються і замерзають, що сприяє виникненню дефектів на поверхні кочення коліс. Таким чином композиційні колодки не являються універсальним заміником чавунних гальмівних колодок [3].



Рис. 1. Дефекти на поверхні катання коліс

Чавунні колодки з підвищеним вмістом фосфору (до 1,5%) на 25-30% більше зносостійкі, ніж стандартні, мають більш високий і стабільний коефіцієнт тертя, але іскрять при гальмуванні. Їх використовують в основному на електропоїздах.

Позитивний вплив на зносостійкість вмісту фосфору в чавуні колодок спостерігається при Р до 1,7%. При подальшому збільшенні вмісту Р підвищується його хрупкість та іскроутворення.

Додатковий вміст легувальних елементів в колодках виготовлених з цих чавунів може позитивно вплинути на фрикційні характеристики колодок, але

дуже суттєвим є розроблення чавуну з зазначенням вузького діапазону вмісту легувальних елементів [3]. Тому що при широкому діапазоні вмісту легувальних елементів можна кожен раз отримувати різну структуру, а значить і різні властивості чавуну, що в свою чергу означатиме не стабільність технологічного процесу і, як наслідок, не матиме перспективи. За допомогою легуючих елементів можна підвищити експлуатаційні характеристики чавунної гальмівної колодки.

Титан та ванадій утворюють в структурі дрібнодисперсні карбіди і нітриди і сприяють підвищенню твердості та зносостійкості чавуну.

Марганець, хром та молібден сприяють перлітизації структури чавуну і підвищують його твердість та зносостійкість, а також можуть впливати на утворення легованого евтектичного цементиту під час кристалізації.

Нікель та мідь сприяють перлітизації і не впливають на утворення цементиту. Перлітизації також сприяють миш'як та олово.

Виходячи з аналізу вище зазначеного легуючих елементи, які погано впливають на теплопровідність чавуну мають позитивний вплив на його зносостійкість, тому потрібно або оптимізувати вміст легуючих елементів з отриманням максимально можливих теплопровідності і зносостійкості, або розробити біметалеву основу з поєднанням двох різних чавунів.

Перспективні гальмівні колодки. Одним з нових і досить перспективним матеріалом є *титанові сплави та композити*. Гальмівні елементи на їх основі мають значний потенціал щодо зменшення ваги і підвищення їх корозійної стійкості до впливу мокрого бруду в зимовий період. При тих самих розмірах колодка з титану має меншу вагу порівняно з чавунною на 37%, а також дана колодка має вищу міцність при підвищених температурах [4]. При дослідженні гальмівних колодок з цих сплавів отримано коефіцієнт тертя в межах (0,35...0,55), що є звичайним показником для гальмування. Але деякі титанові сплави показали більш високий коефіцієнт тертя та окрім цього ефективність їх гальмування не знижувалась з підвищенням температури.

Fe-Cu-Cr-графітові спечені матеріали, це новий клас матеріалів з якого сьогодні виготовляють колодки залізничному рухомого складу для заміни звичайних чавунних колодок, з метою зменшення шуму при гальмуванні [5]. Випробування цих сплавів показують, що шорсткість зменшується більш ніж в 10 раз. Але даний спечений сплав має меншу зносостійкість із-за меншої міцності на зсув, до якої призводить низька теплопровідність даного сплаву.

Карбід-кремнієвих фільтри в чавунних композиційних гальмівних колодках. Чавунні композиційні гальмівні колодки, що містять в собі карбід-кремнієві (SiC) керамічні фільтри (рис. 2) були розроблені для підвищених швидкостей в звичайних поїздах. Тим не менш є припущення, що вони сприятимуть термічним навантаженням оскільки ці фільтри набагато твердіші ніж чавун. Потрібно зменши-

ти їх вплив на поверхню кочення при цьому залишивши високі характеристики тертя при високих швидкостях руху.

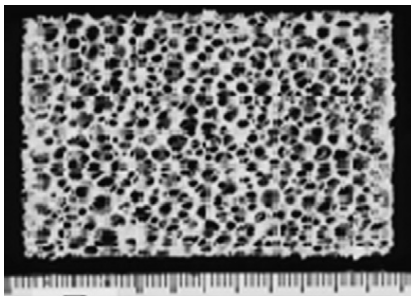


Рис. 2. Фотографія фільтру [6]

В роботі [6] було проведено перевірку на повномасштабному стенді чавунних композиційних гальмівних колодок в яких кількість фільтрів і частка SiC в фільтрі були різними (рис. 3). Такі колодки були розроблені так щоб забезпечити високу ефективність гальмування на підвищених швидкостях руху навіть за умови зменшення площі SiC на поверхні тертя.

Дуже значним є виявлення того факту, що температура гальмівної колодки зв'язана з коефіцієнтом тертя і включення SiC фільтрів в гальмівну колодку запобігає підвищенню температури і збільшує коефіцієнт тертя.

Чавунні литі гальмівні колодки зі зменшеним вмістом нікелю та молібдену, що містять пінокераміку. Для високошвидкісних поїздів північної частини Японії розроблені литі чавунні колодки які мають зменшений вміст нікелю (Ni) та молібдену (Mo). Зменшення вмісту Ni та Mo є дуже важливим питанням, оскільки ці два метали є рідкісними і як наслідок мають високу вартість. Але слід відзначити, що Ni та Mo відіграють важливу роль в підвищенні коефіцієнту тертя та зменшенні зносу гальмівних колодок при високих швидкостях. Відомі чавуни з піно-керамічними вставками (рис. 4) зі зменшеним вмістом Ni та Mo. Тестування цих гальмівних колодок в реальних умовах показали гарні результати [7]. Тому, запозичення досвіду введення в литі чавунні гальмівні колодки порошоків може суттєво допомогти в розробленні універсальної гальмівної колодки.

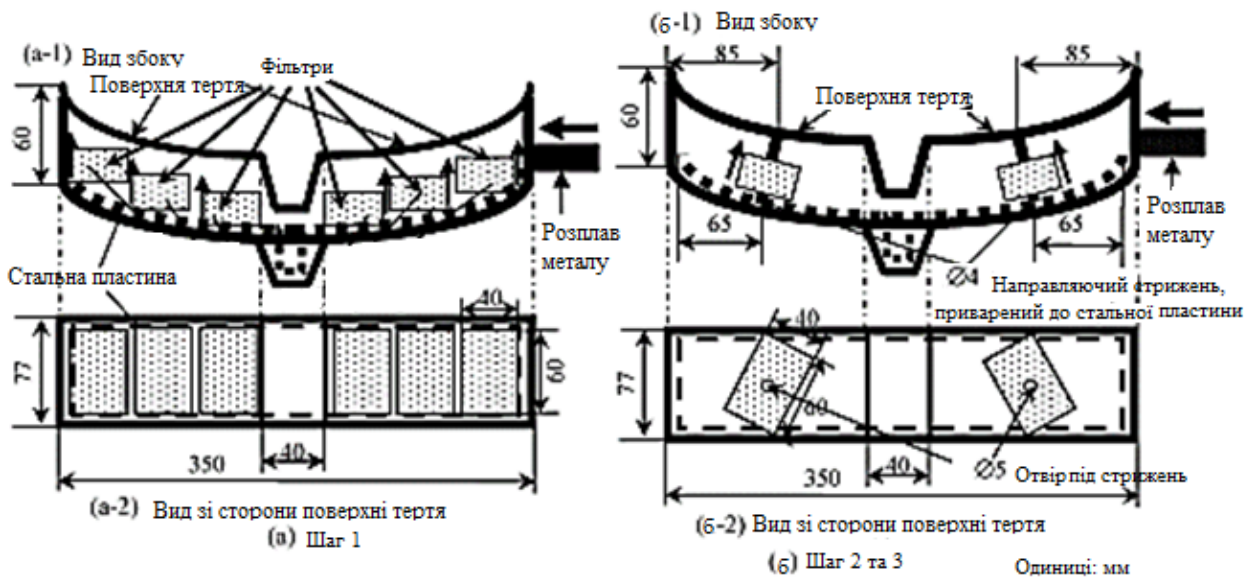


Рис. 3. Структура гальмівної колодки з фільтрами [6]

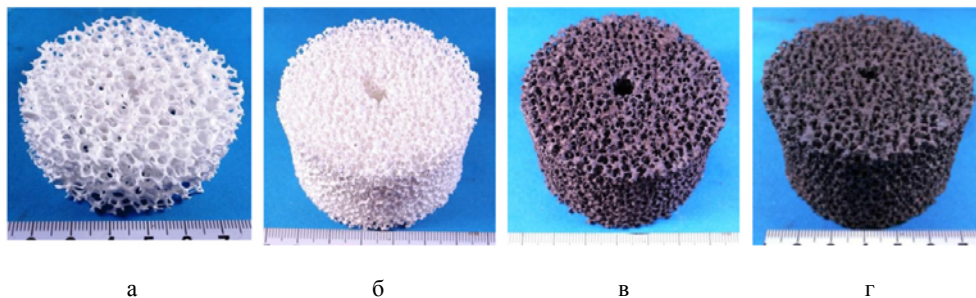


Рис. 4. Піно-керамічні вставки в матеріал чавуну:
 а – алюміній + AlPO₄; б – алюміній; в – титанат алюмінію; г – карбід кремнію [7]



Рис. 5. Схема по отриманню оптимального варіанту конструкції гальмівної колодки для конкретного рухомого складу

Результати. Для оцінки сукупності всіх факторів, що впливають на розробку універсальної гальмівної колодки авторами була розроблена цільова функція. Фізичне значення якої полягає в наступному: відведення тепла під час гальмування і оптимізація коефіцієнту тертя повинні наближатися до максимуму ($f_1(Q, f_{\text{тр}}) \rightarrow \max$), в той час як знос пари «колесо-колодка», екологічна безпека, собівартість повинні наближатися до мінімуму ($f_2(U, E, C) \rightarrow \min$) (рис. 5):

$$U(f_1, f_2) = \begin{matrix} f_1(Q, f_{\text{тр}}) \rightarrow \max \\ f_2(U, E, C) \rightarrow \min \end{matrix} \rightarrow \max,$$

де Q – обсяг відведеного тепла; $f_{\text{тр}}$ – коефіцієнт тертя; U – величина зносу робочих поверхонь трибо-системи; E – рівень екологічної безпеки; C – собівартість виготовлення та експлуатації гальмівної колодки.

Висновки. На сьогодні відомо значна кількість науково-технічних робіт по розробленню нових матеріалів і вдосконаленню вже існуючих гальмівних колодок для залізничного рухомого складу. Для якісної оцінки перспективних конструкцій фрикційних елементів гальмівної системи та прогнозування найвигіднішої запропонована цільова функція по отриманню оптимального варіанту конструкції та матеріалу гальмівної колодки для конкретного рухомого складу, розробка якої отримана на основі аналізу матеріалів та характеристик фрикційних елементів гальмівних систем.

Література

1. Асадченко В.Р. Автоматические тормоза подвижного состава / В.Р. Асадченко // Учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта. М.: Маршрут, 2006. - 392 с.

2. Худокормов Д. А. Повышение прочности и теплопроводности чугуна путём управления процессами формирования его структуры : дис. канд. техн. наук : 05.16.04 / Худокормов Дмитрий Андреевич – Минск, 2000. – 144 с.
3. Неижко И. Г. Тормозные колодки железнодорожного транспорта / И. Г. Неижко, В. Л. Найдек, В. П. Гаврилюк. – Киев, 2009. – 121 с. – (ГП "Редакция журнала "Охрана труда").
4. Tribological investigation of titanium-based materials for brakes / Peter J. Blau, Brian C. Jolly, Jun Qu та ін.] // Wear. – 2007. – №263. – С. 1202–1211.
5. Tribological study of Fe–Cu–Cr–graphite alloy and cast iron railway brake shoes by pin-on-disc technique / C. Ferrer, M. Pascual, D. Busquets, E. Rayón. // Wear. – 2010. – №268. – С. 784–789.
6. Influence of silicon carbide filters in cast iron composite brake blocks on brake performance and development of a production process / T. Miyauchi, T. Tsujimura, K. Handa та ін.] // Wear. – 2009. – №267. – С. 833–838.
7. Friction and wear performance of nickel and molybdenum-reduction cast iron composite brake blocks including ceramic foams / T. Miyauchi, J. Nakayama, N. Fujiwara та ін.] // Wear. – 2012. – №302. – С. 1436–1443.

References

1. Asadchenko V.R. Avtomaticheskie tormoza podvizhnogo sostava / V.R. Asadchenko // Uchebnoe posobie dlja vuzov zh.-d. transporta. M.: Marshrut, 2006. - 392 s.
2. Hudokormov D. A. Povyshenie prochnosti i teploprovodnosti chuguna putjom upravlenija processami formirovanija ego struktury : dis. kand. tehn. nauk : 05.16.04 / Hudokormov Dmitrij Andreevich – Minsk, 2000. – 144 s.
3. Neizhko I. G. Tormoznye kolodki zheleznodorozh-nogo transporta / I. G. Neizhko, V. L. Najdek, V. P. Gavriljuk. – Kiev, 2009. – 121 s. – (GP "Redakcija zhurnala "Ohrana truda").

4. Tribological investigation of titanium-based materials for brakes / Peter J. Blau, Brian C. Jolly, Jun Qu та ін.] // Wear. – 2007. – №263. – С. 1202–1211.
5. Tribological study of Fe–Cu–Cr–graphite alloy and cast iron railway brake shoes by pin-on-disc technique / C. Ferrer, M. Pascual, D. Busquets, E. Rayón. // Wear. – 2010. – №268. – С. 784–789.
6. Influence of silicon carbide filters in cast iron composite brake blocks on brake performance and development of a production process / T. Miyauchi, T. Tsujimura, K. Handa та ін.] // Wear. – 2009. – №267. – С. 833–838.
7. Friction and wear performance of nickel and molybdenum-reduction cast iron composite brake blocks including ceramic foams / T. Miyauchi, J. Nakayama, N. Fujiwara та ін.] // Wear. – 2012. – №302. – С. 1436–1443.

Ямшинский М.М., Назаренко В.С., Кравченко Е.А.
Анализ тормозных колодок и пути оценки их перспективных конструкций.

В данной статье представлены результаты анализа фрикционных элементов тормозной системы. Установлено, что тормозные колодки разделяют на категории по типу материала, из которого они сделаны и формой исполнения. Согласно первой выпускаются три вида колодок: чугунные стандартные, композиционные и чугунные с повышенным содержанием фосфора (фосфористые). По результатам анализа оценены существующие и перспективные фрикционные материалы для изготовления тормозных колодок. К перспективным материалам следует отнести: титановые сплавы, Fe-Cu-Cr-графитовые спеченные материалы, SiC фильтры, чугунные колодки содержащие пенокерамику. На основе проведенного анализа материалов и характеристик фрикционных элементов тормозных систем разработана целевая функция, которая позволяет подбирать наиболее выгодный вариант конструктивного исполнения тормозной колодки для конкретного подвижного состава. Физическое значение целевой функции заключается в следующем: отвод тепла при торможении и оптимизация коэффициента трения должны приближаться к максимуму, в то время как износ пары «колесо-колодка», экологическая безопасность, себестоимость должны приближаться к минимуму.

Ключевые слова: тормозные чугунные колодки, тормозные композиционные колодки, пенокерамика, карбид-кремниевые фильтры, теплопроводность, износостойкость.

Yamshinsky M., Nazarenko V., Kravchenko K.
Analysis of the brake pads and the ways of assessing their perspective designs.

This article presents the results of the analysis of the friction brake system. It has been established that the brake pads are separated into categories based on the type of material from which they are made and the shape of performance. According to the first available three types of pads: gray cast iron composite and cast iron with a high content of phosphorus (phosphorous). According to the analysis evaluated estimate existing and perspective friction materials for the manufacture of brake pads. Promising materials include: titanium alloys, Fe-Cu-Cr-graphite sintered materials, SiC filters, iron pads which containing ceramic foam. Based on the analysis of materials and characteristics of friction elements of brake systems, developed the objective function, which allows to choose the most profitable option of embodiment of brake pads for specific vehicles. The physical significance of which in the following: heat dissipation during braking and optimization of the coefficient of friction should approach to the maximum, while wear a pair of "wheel-block", environmental safety, the cost should approach to the minimum.

Keywords: iron brake pads, composite brake pads, ceramic foams, SiC filters, heat conduction, wear resistance.

Ямшинський М.М. – к.т.н., доцент кафедри «Ливарного виробництва чорних та кольорових металів та сплавів» НТУУ «КПІ».

Назаренко В.С. – аспірант кафедри «Ливарного виробництва чорних та кольорових металів та сплавів» НТУУ «КПІ», начальник НДВ матеріалознавства ДП «ДНДЦ УЗ».

Кравченко К.О. – к.т.н., доцент кафедри логістичного управління та безпеки руху на транспорті Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.

Рецензент: д.т.н., проф. Горбунов М.І.

Стаття подана 01.04.2015