

Шевченко С.І.

ФРИКЦІЙНІ ВУГЛЕЦЬ-ВУГЛЕЦЕВІ КОМПОЗИТНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ГАЛЬМОВИХ СИСТЕМ РУХОМОГО СКЛАДУ

У роботі розглянута актуальна науково-технічна проблема підвищення ефективності гальмування рейкового рухомого складу шляхом поліпшення умов взаємодії коліс з гальмівними колодками шляхом розв'язку науково-обґрунтованих технічних рішень, що забезпечують підвищення ефективності роботи гальмівних пристроїв. На підставі аналізу досліджень встановлено, що серійні фрикційні матеріали для гальмівних систем рухомого складу недостатньо відповідають сучасним вимогам, це обумовлено суттєвою залежністю їх фрикційних характеристик від основних факторів процесу гальмування, таких як, швидкості ковзання, питомого навантаження і температури на контактній поверхні тертя. Встановлено, що температура в контактній зоні тертя є основним та вирішальним фактором, який визначає працездатність пари тертя, величину та стабільність коефіцієнта тертя фрикційного сполучення. На підставі експериментальних досліджень встановлено, що модифіковані вуглець-вуглецеві композиційні матеріали на основі вуглецевої тканини УРАЛ ТМ-4 та УРАЛ Т-22 з піровуглецевою матрицею та абразивними модифікаторами тертя у вигляді карбїду бору, оксиду алюмінію та бору аморфного забезпечують досить високий коефіцієнт тертя на рівні 0.45 при температурі 0 °С та його стабільність у температурному діапазоні поверхні тертя до 500 °С. Верхня температурна межа обумовлена не властивостями матеріалу, а технічними можливостями експериментальної установки. Встановлено вплив на фрикційні характеристики модифікованих вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів якісного, кількісного та фракційного складу абразивних модифікаторів тертя. Рекомендовано використовувати, як модифікатори тертя дрібнодисперсні порошки карбїду бору і аморфного бору. Статистичні експериментальні дослідження натурних зразків з нових матеріалів з модифікаторами тертя у вигляді дрібнозернистого карбїду бору і аморфного бору дозволили встановити ймовірнісні поля розподілу величини коефіцієнта тертя у функції температури контактної поверхні тертя і доказово підтвердити високу ефективність модифікованих вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів.

Ключові слова: рухомий склад, гальмівні колодки, фрикційні матеріали, вуглець-вуглецеві композитні матеріали, коефіцієнт тертя.

Актуальність дослідження. Стійка тенденція зростання обсягів вантажних та пасажирських перевезень на залізницях України порівняно з автомобільними перевезеннями, зумовлена значним підвищенням швидкості руху поїздів, економічними та екологічними факторами. Так, на залізницях Європи рух здійснюється зі швидкістю 250-350 км/год, що є економічно доцільним [1]. Безпека руху в таких умовах регламентується жорсткими нормативними вимогами за величиною гальмівного шляху, часу гальмування і уповільнення, що в свою чергу визначається ефективністю роботи гальмівних систем, і при цьому проблема гальмування набуває особливої актуальності.

Слід зазначити, що високошвидкісні поїзди останнього покоління забезпечуються декількома гальмівними системами: електрична (рекуперативна, реостатна), магнітно-рейкова (екстремне гальмування), вихрострумова (що не використовує сили тертя) і фрикційна (механічна), які працюють за спеціальним алгоритмом [2]. Нові гальмівні системи показали досить високу працездатність та ефективність, проте для забезпечення безпеки руху, створення значного уповільнення та великої енергоємності, незамінними залишаються механічні гальмівні пристрої, в яких гальмівні зусилля створюються безпосередньо фрикційним сполученням: гальмівна колодка – гальмівний диск або ходові колеса.

Постановка проблеми. За умовами температурної напруженості фрикційного сполучення колодкові гальмівні пристрої рухомого складу відповідають середньому, а за тривалого гальмування на спусках до важкого режиму роботи. У механічних гальмівних системах застосовуються різні фрикційні матеріали: чавун (сірий, перлітний, фосфористий, титанистий – та модифікації); композиційні (азбестові та безазбестові, з різноманітними компонентами) та металокерамічні [3-7]. Аналіз експериментальних досліджень вказує на суттєву залежність основного вихідного параметра фрикційного сполучення це реалізованого коефіцієнта тертя від питомого тиску та швидкості ковзання, які визначають роботу сил тертя на контакті. При цьому вплив на коефіцієнт тертя температури контактної поверхні фрикційного сполучення, яке виникає внаслідок роботи сил тертя, вивчено недостатньо.

Теоретичний аналіз дослідження. Випробування натурних гальмівних колодок з чавуну в діапазоні до 250 км/год показали, що на поверхні катання коліс при початковій швидкості гальмування 120 км/год і вище утворюються поперечні термічні тріщини. Тривале або екстремне гальмування з початкових швидкостей 120-140

км/год призводило до місцевого перегріву контактних поверхонь коліс та колодок через високі локальні температури на фрикційному контакті. При цьому, відбувалися незворотні структурні утворення мартенситу в колісній сталі, а на поверхні катання коліс при наступних гальмуваннях утворювалися задири [6].

Композиційні гальмівні колодки на сполучному каучуковому, типу ТІР-308 і 2110 не надають такого негативного впливу на поверхні катання коліс, як чавунні. Навіть, при підвищеній швидкості початку гальмування, вони мають стабільніший коефіцієнт тертя, підвищений ресурс і кращі показники за рівнем шуму при гальмуванні. Приблизно такі характеристики мають композиційні колодки з матеріалу V-BKS типів LL, L, K [5, 7]. Композиційні гальмівні колодки зазвичай використовуються при швидкостях руху до 160 км/год.

Досвід експлуатації металокерамічних гальмівних колодок на електровозах з максимальною швидкістю руху 220 км/год, показав, що механічне гальмо повинне включатися після електричного на малих швидкостях руху та у випадках екстреного гальмування, що обумовлено різким збільшенням термічних напружень та структурними змінами матеріалу поверхні катання колеса, появою сітки поверхневих тріщин, які згодом розростаються і сприяють інтенсивному зношуванню поверхні колеса.

Наведений аналіз досліджень показує, що експлуатаційні межі застосування простих та гальмівних пристроїв з чавунними, композиційними або металокерамічними колодками зумовлені термічною руйнівною дією на контактні поверхні коліс і гальмівних колодок.

Метою даної роботи є оцінка триботехнічних характеристик фрикційних вуглець-вуглецевих композитних матеріалів для гальмових систем рухомого складу, структурою армування 2-D з вуглецевої тканини УРАЛ ТМ-4 та УРАЛ Т-22.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Виконати попередні порівняльні експериментальні дослідження фрикційних вуглець-вуглецевих композитних матеріалів на інерційній машині тертя.

2. Визначити значення триботехнічних параметрів та характеру зміни коефіцієнта тертя залежно від температури в контактній зоні фрикційного сполучення.

Викладення основного матеріалу дослідження. Протягом багатьох років нами проводяться експериментальні дослідження фрикційних матеріалів для гальмівних пристроїв у виді вуглець-вуглецевих (С-С) композиційних матеріалів [8, 9], які можуть бути використані для виготовлення гальмівних колодок та дисків. Однією з основних переваг вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів (В-ВКМ) є здатність зберігати досить високі пружні характеристики міцності при роботі в умовах дуже високих температур.

Експериментальні дослідження проводились на інерційній машині тертя, яка реалізує схему «шків - гальмівні колодки». Як вихідні параметри при записі процесів гальмування були прийняті: гальмівний момент - M_T , Нм; швидкість обертання гальмівного шківу - n , об/хв; зусилля в замикаючій тязі - F_z , Н; зусилля зчеплення фрикційних поверхонь - $F_{зч}$, Н; температура контактної поверхні за довжиною колодки - $t_{кі}$, °С. Термопарі встановлювалися симетрично по поздовжній осі колодки в спеціальних отворах на відстані ~ 1 мм від контактної поверхні. Електричні сигнали від тензодатчиків та термопар реєструвалися на магнітному диску ПЕОМ з подальшою автоматичною обробкою результатів випробувань. Характер зміни вихідних параметрів від початку гальмування до повної зупинки у реальному масштабі часу реєструвався на осцилограмах.

Зразки для експериментів були виготовлені з наступних матеріалів:

- вуглець-вуглецеві композитні матеріали (типу УТ4-1, 2, 3), структури армування 2-D з вуглецевої тканини УРАЛ ТМ-4 на основі віскозних волокон, ущільнені піровуглецем; щільність 1.38 - 0.02 г/см³; відкрита пористість 10 - 2%; пікнометрична щільність 1.55 - 0,02 г/см³; питомий вміст вуглецевого волокна 0.57 г/см³; піровуглецю 0.81 г/см³; межа міцності при стиску перпендикулярно шарам тканини (поверхні тертя) 160-200 МПа.

-В-ВКМ (тип УТ22-8Б), структура армування 2-D, взаємно перпендикулярне пошарове укладання з вуглецевої тканини УРАЛ Т-22 та мідного дроту діаметром 0.15 мм, підпресований та прошитий, ущільнений піровуглецем; щільність 2.14 г/см³; відкрита пористість 22.62%; пікнометрична щільність 2.77 г/см³;

- модифікований В-ВКМ (тип УТ22-3Б), структура армування 2-D з вуглецевої тканини УРАЛ Т-22 за другою технологічною схемою, ущільнений піровуглецем; щільність 1.65 г/см³; відкрита пористість 9.81%; пікнометрична щільність 1.83 г/см³; вуглецеву матрицю введено карбід бору В₄С, певної дисперсності та % вмісту;

- модифікований В-ВКМ (тип УТ22-4Б), структура армування аналогічна попередньому матеріалу, ущільнений піровуглецем; щільність 1.56 г/см³; відкрита пористість 11,67%; пікнометрична щільність 1.77 г/см³; відрізняється дисперсністю В₄С у матриці;

- модифікований В-ВКМ (тип УТ22-10Б), структура армування аналогічна попереднім матеріалам, підпресований і прошитий; щільність 1.50 г/см³; відкрита пористість 10.23%; пікнометрична щільність 1.67 г/см³; в матрицю пошарово введений аморфний бор.

Модифіковані В-ВКМ у порівнянні з «чистими» композитами мають такі ж показники за питомим вмістом вуглецевого волокна і піровуглецю, але мають більш високі пружні та міцнісні характеристики, внаслідок заповнення пор матеріалу наповнювачем.

Експериментальні дослідження проводилися як порівняльні за ідентичних умов, причому, питомий тиск та швидкість початку гальмування у всіх експериментах були постійними і відповідно становили - 0.15 МПа та 12.6 м/с. Попереднє розігрівання поверхні тертя з похибкою $\pm 5^\circ\text{C}$ виконувалося багаторазовим

підгальмовуванням, у кожній серії випробувань при встановленій постійній температурі проводилося не менше 50 вимірів.

Характер зміни коефіцієнта тертя залежно від температури в контактній зоні фрикційного сполучення для В-ВКМ матеріалів типу УТ4 та УТ22-8Б показаний на рис. 1. У всіх серіях експериментів з фрикційними В-ВКМ при температурній напруженості до 500 °С не відмічене жодних руйнувань чи пошкоджень, як гальмівних накладок, так і поверхні контртіла – шківів з колісної сталі.

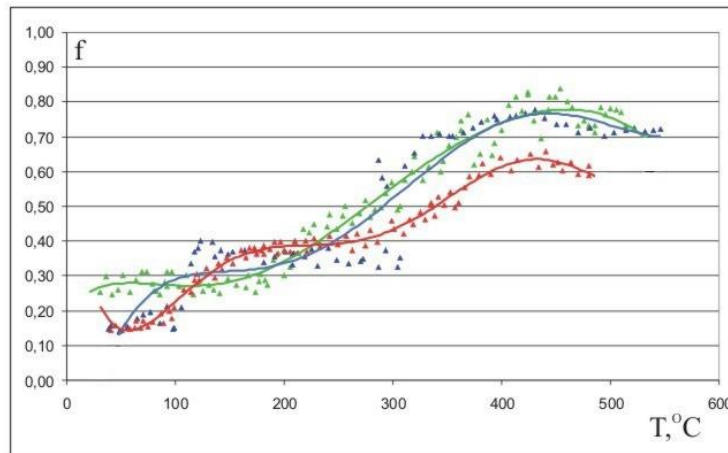


Рисунок 1 - Залежність зміни коефіцієнта тертя від температури

Аналіз результатів експериментальних досліджень (рисунок 1) показав, що коефіцієнт тертя фрикційного сполучення колісна сталь В-ВКМ має стійку тенденцію зростання зі збільшенням температури контактної поверхні. При цьому, зростання коефіцієнта тертя починалося при температурі 80-100 °С і досягало свого стабільного значення 0,5-0,7 після нагрівання зони контакту до температури 400 °С. При малих температурах фрикційного сполучення (до 50 °С) величина коефіцієнта тертя змінювалася в межах від 0,15 до 0,28.

З метою підвищення та стабілізації коефіцієнта тертя у широкому діапазоні зміни температури контактної поверхні запропоновано модифікувати вуглецеву матрицю з низькомодульними волокнами введенням твердих дрібнозернистих матеріалів типу карбід бору та аморфного бору [10]. Результати випробувань модифікованого зразка В-ВКМ (УТ22-3Б) наведено на рисунку 2.

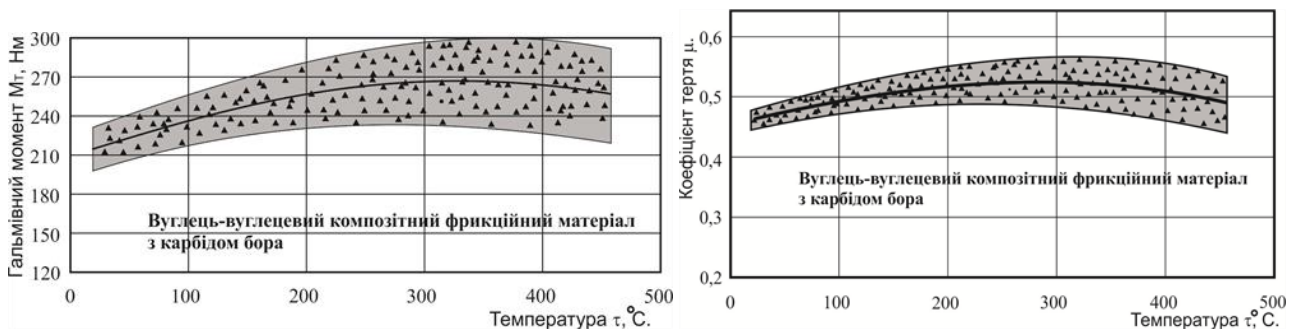


Рисунок 2 - Залежність зміни гальмівного моменту та коефіцієнта тертя від температури

Стійкість триботехнічних характеристик В-ВКМ підтверджується результатами випробувань експериментальних зразків з різних партій виготовлення за єдиною технологічною схемою.

Зносостійкість дослідних зразків визначалася за ваговим методом – до і після випробувань, а також спеціальною ресурсною програмою навантаження, при цьому встановлено, що нові матеріали значно перевершують серійні. Величина зношування нових В-ВКМ становить не більше 15-20% від аналогічних показників серійних матеріалів.

Експериментальними дослідженнями також встановлено, що теплопровідність нових матеріалів істотно вища, ніж композиційних типу V-VKS або ТІР. За оцінкою фактичної різниці температур на контакті та з тильного боку накладок з В-ВКМ, враховуючи теплофізичні властивості вуглецевих волокон армуючого каркасу, коефіцієнт теплопровідності становив 11-70 Вт/(м·К). Для графітів цей показник при 0 °С дорівнює 174, а при 100 °С - 158 Вт/(м·К) [11].

Зниження температурної напруженості на контактній поверхні та покращення теплообміну суттєво зменшують можливість пошкодження гальмівних колодок та поверхонь катання гальмівних коліс. Особливо перспективним представляється використання модифікованих В-ВКМ з високим і стабільним коефіцієнтом

тертя, як гальмівні накладки дискових гальм високошвидкісного рухомого складу, у яких температура на контакті досягає 800-1000 °С.

Отримані результати випробувань експериментальних зразків з В-ВКМ слід вважати попередніми. Для уточнення технічних властивостей та трибологічних характеристик фрикційних ВКМ необхідно провести натурні випробування на сертифікованому інерційному стенді. Слід зазначити широкі можливості вдосконалення фрикційних вуглець композитних матеріалів для конкретних умов використання.

Висновки. Нові В-ВКМ на основі вуглецевої матриці з армуючим каркасом з вуглецевих волокон структури 2-D, ущільнені піровуглецем до щільності 1.36-1.38 г/см³ можуть бути використані як фрикційні матеріали. Попередні експериментальні дослідження проводилися як порівняльні, підтвердили досить високі механічні, теплофізичні та триботехнічні властивості нових фрикційних матеріалів.

Експериментальні дослідження показали, що модифіковані В-ВКМ із наповнювачем з аморфного бору мають практично стабільний коефіцієнт тертя на рівні 0.45 – 0.55 у температурному діапазоні 15 – 500 °С. Перспективними є фрикційні В-ВКМ з армуючим каркасом із високомодульних вуглецевих волокон структури 3D, 4D, ..., nD, модифіковані введенням у матрицю аморфного бору або карбиду бору.

Література

1. Лабренц Ф. Сравнение концепций высокоскоростных поездов Европы. Железные дороги мира, 2004, №9 - С. 18-24.
2. Schlosser W., Aurich S. Die modernen Bremssysteme. Glasers Annalen, 2001, №8. S. 273-277.
3. Zander C.-P. Metal-ceramic braking clamps on powerful locomotives. Glasers Annalen, 2001, №4. P. 157-165.
4. Ehlers H.-R. et.al. Potential and limits of opportunities of the block brake. Glasers Annalen, 2002, №6/7. P. 290-300.
5. Вуколов Л.А., Жаров В.А. Сравнительные характеристики тормозных колодок различных поставщиков. Вестник ВНИИЖТ, 2005, №2 - С. 21-25.
6. Vukolov L.A., Voronchikhin A.I. New Solutions in choose of material end design of Brake shoes required by Railroad applications. Proceedings of World Tribology Congress III, September 12-16, 2005, Washington, D.C., USA. Extended Abstracts in electronic form CD-ROM of the papers.
7. Bauer H. Die Reibungsmaterialien fur die Bremsen. Glasers Annalen, 1999, №11/12. S. 472-475.
8. Старченко В.Н., Полупан Е.В., Шевченко С.И. Повышение эффективности торможения использованием новых углерод-композиционных материалов. Вісник СХУ ім. В.Даля, 2004, №7 (77), (Частина 1). – С. 137-142.
9. Starchenko V. Nal C-C composites of a new generation for the automobile brake devices / Valery Starchenko, Sergey Shevshenko, Evgeniy Rudenko // ТЕКА Commission of motorization and power industry in agriculture. – 2010 – Volume XC. – P. 310-315.
10. Патент на винахід 82267, C04B 35/83 C04B 35/52 F16D 69/00. Композитний матеріал на основі вуглець-вуглець для фрикційних елементів / Старченко В.М., Полупан Є.В., Шевченко С.І. – Опубл. 25.03.2008. Бюл. №6.
11. Беляев Н.М. Основы теплопередачи. Учебник. – К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 343 с.

References

1. Labrenc F. Sravnenie koncepcij vysokoskorostnyh poezdov Evropy. Zheleznye dorogi mira, 2004, №9 - S. 18-24.
2. Schlosser W., Aurich S. Die modernen Bremssysteme. Glasers Annalen, 2001, №8. S. 273-277.
3. Zander C.-P. Metal-ceramic braking clamps on powerful locomotives. Glasers Annalen, 2001, №4. P. 157-165.
4. Ehlers H.-R. et.al. Potential and limits of opportunities of the block brake. Glasers Annalen, 2002, №6/7. P. 290-300.
5. Vukolov L.A., Zharov V.A. Sravnitel'nye harakteristiki tormoznyh kolodok razlichnyh postavshchikov. Vestnik VNIIZhT, 2005, №2 - S. 21-25.
6. Vukolov L.A., Voronchikhin A.I. New Solutions in choose of material end design of Brake shoes required by Railroad applications. Proceedings of World Tribology Congress III, September 12-16, 2005, Washington, D.C., USA. Extended Abstracts in electronic form CD-ROM of the papers.
7. Bauer H. Die Reibungsmaterialien fur die Bremsen. Glasers Annalen, 1999, №11/12. S. 472-475.
8. Starchenko V.N., Polupan E.V., Shevchenko S.I. Povyshenie effektivnosti tormozheniya ispol'zovaniem novykh uglevod-kompozicionnyh materialov. Visnik SNU im. V.Dalya, 2004, №7 (77), (Chastina 1). – S. 137-142.
9. Starchenko V. Nal C-C composites of a new generation for the automobile brake devices / Valery Starchenko, Sergey Shevshenko, Evgeniy Rudenko // ТЕКА Commission of motorization and power industry in agriculture. – 2010 – Volume XC. – P. 310-315.
10. Patent na vinahid 82267, C04B 35/83 C04B 35/52 F16D 69/00. Kompozitnij material na osnovi vuglec-vuglec dlya frikciynih elementiv / Starchenko V.M., Polupan E.V., Shevchenko S.I. – Opubl. 25.03.2008. Byul. №6.
11. Belyaev N.M. Osnovy teploperedachi. Uchebник. – K.: Vyscha shk. Golovnoe izd-vo, 1989. – 343 s.

The paper considers the actual scientific and technical problem of increasing the braking efficiency of rail rolling stock by improving the conditions of interaction between the wheels and the brake pads through the development of scientifically based technical solutions that ensure an increase in the efficiency of the braking devices. Based on the research analysis, it was established that serial friction materials for braking systems of rolling stock do not sufficiently meet modern requirements, this is due to the significant dependence of their friction characteristics on the main factors

of the braking process, such as sliding speed, specific load and temperature on the friction contact surface. It was established that the temperature in the friction contact zone is the main and decisive factor that determines the efficiency of the friction pair, the value and stability of the friction coefficient of the friction coupling. On the basis of experimental studies, it was established that modified carbon-carbon composite materials based on URAL TM-4 and URAL T-22 carbon fabric with a pyrocarbon matrix and abrasive friction modifiers in the form of boron carbide, aluminum oxide, and amorphous boron provide a fairly high coefficient of friction at 0.45 at a temperature of 0 °C and its stability in the temperature range of the friction surface up to 500 °C. The upper temperature limit is determined not by the properties of the material, but by the technical capabilities of the experimental setup. The influence of the qualitative, quantitative and fractional composition of abrasive friction modifiers on the frictional characteristics of modified carbon-carbon composite materials was established. It is recommended to use finely dispersed powders of boron carbide and amorphous boron as friction modifiers. Statistical experimental studies of full-scale samples from new materials with friction modifiers in the form of fine-grained boron carbide and amorphous boron made it possible to establish probabilistic fields of distribution of the friction coefficient as a function of the temperature of the friction contact surface and to prove the high efficiency of modified carbon-carbon composite materials.

Keywords: *rolling stock, brake pads, friction materials, carbon-carbon composite materials, coefficient of friction*

Шевченко С.І. - доцент кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин, к.т.н. Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля