

УДК 62-592.1 + 53.082

ЗАЛЕЖНІСТЬ СИЛИ ТЕРТЯ ДИСКОВОГО ГАЛЬМА ВІД СЕРЕДНЬОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ФРИКЦІЙНОГО КОНТАКТУ

Доума Мансур Аль-Махді, Осенін Ю.Ю., Сергієнко О.В.

DEPENDENCE OF THE FRICTION FORCE OF DISC BRAKE ON THE AVERAGE TEMPERATURE OF FRICTIONAL CONTACT

Douma Mansur Al Mahdy, Osenin Yu.Yu., Sergienko O.V.

В статті встановлена залежність сили тертя дискового гальма від температури, яка генерується в зоні фрикційного контакту в результаті силової взаємодії робочих елементів гальма. Показано, що сила тертя при взаємодії елементів «вуглець-сталь» і «чавун-сталь» мають протилежні тенденції при збільшенні температури (сила тертя для вуглецю збільшується з ростом температури, для чавуну зменшується). Дістало подальшого розвитку уявлення про залежність зміни сили тертя для з'єднань «вуглець-сталь» і «чавун-сталь» в умовах впливу температури.

Врахування закономірності залежності сили тертя дискового гальма від температури на конструкторсько-технологічній стадії створення дискового гальма дозволяє підвищити його надійність та забезпечити працездатність.

Ключові слова: рухомий склад, дискове гальмо, сила тертя, фрикційні матеріали, залежність.

Вступ. Однією з актуальних проблем сучасного залізничного транспорту є гальмування рухомого складу. Проблема обумовлена високим рівнем швидкості на залізниці, який досягає значень 350 км/год. Негативними наслідками гальмування рухомого складу є висока температура в зоні контакту фрикційних елементів гальма, що досягає значень у 600-700 градусів за Цельсієм та впливає на зменшення значень коефіцієнту тертя, що реалізується, та збільшення інтенсивності зношування робочих поверхонь елементів гальма [1, 2].

Головними напрямками вирішення цієї проблеми на сучасному етапі є розробка нових фрикційних матеріалів, які б за рахунок своїх індивідуальних властивостей мали змогу нівелювати негативний вплив високої температури на фрикційні характеристики дискового гальма [3, 4].

Як відомо, процес розробки нових фрикційних матеріалів довготривалий та коштовний і на цей час

фрикційні матеріали, які б повністю задовольняли сучасним вимогам за критеріями коефіцієнту тертя, стійкістю до термічного впливу, а також прийнятної інтенсивності зношування робочих поверхонь відсутні [5, 6].

Ефективність конструкторсько-технологічних засобів щодо створення нових фрикційних матеріалів та удосконалення конструкції фрикційного гальма залежить від достеменної інформації про процеси, що відбуваються в зоні фрикційного контакту дискового гальма, головними з яких є вплив температури, що генерується, на характеристики силової взаємодії елементів тертя, а саме безпосередньо на силу тертя дискового гальма [5, 6]. Результати отримані для перспективного фрикційного матеріалу на основі вуглецю та найбільш поширеному – чавуну.

Метою статті є встановлення залежності сили тертя дискового гальма від температури, яка генерується в зоні фрикційного контакту в результаті силової взаємодії його елементів, що виготовлені з вуглецю та чавуну.

Викладення основного матеріалу. Експериментальне дослідження виконане на створеному лабораторному натурному стенді кафедри гідрогазодинаміки Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, який відтворює умови силової взаємодії елементів дискового гальма в реальному масштабі часу, діючих сил, теплових потоків та швидкостей відносного руху його елементів (рис. 1) [7].

Стенд містить асинхронний електродвигун 1 номінальною потужністю 75 кВт і частотою обертів 1480 об/хв, з'єднаний пружними муфтами 3, редуктором 2, а також з підшипниковим вузлом 3, на валу якого розміщений гальмівний диск 6, гальмівні накладки 7, що закріплені за допомогою механізму 5, з'єданого з важільною системою

навантаження 4 дискового гальма (зусилля задається еталонними вагами 9), та пружну систему вимірювання сили тертя 8.

Важільний механізм 5, що використовується для притиснення гальмівних накладок 7 до гальмівного диска 6, та сам диск є конструктивними елементами дискового гальма трамвайного вагона ЛТ-10 виробництва ПАТ «Луганськтепловоз». Трибологічні характеристики контакту робочих елементів приведені до відповідності з реальними [8]. Важільна система навантаження 4 дискового гальма, у залежності від потрібного гальмівного зусилля, має два варіанти реалізації, які відрізняються значенням передаточного числа.

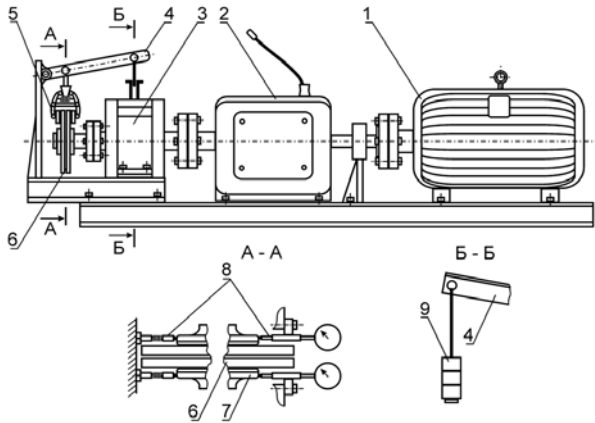


Рис. 1. Принципова схема експериментального стенда

Передаточне число важільної системи, що використовувалося у нашому випадку, визначається за формулою:

$$n = k \cdot \eta \cdot [(a + b)/a] \cdot c/d, \quad (1)$$

де a, b, c, d – довжини відповідних важелів;

$k = 1/[2 \operatorname{tg}(6^\circ)] = 4,76$ – геометрична константа;

η – механічний ККД важільної передачі ($\eta \approx 0,95$).

Зусилля притиску, що передається на одну гальмівну накладку експериментального стенда визначається як:

$$N = n \cdot G/2, \quad (2)$$

де G – зусилля навантаження стенда, що задається еталонними вагами.

У якості редуктора (поз. 2 на рис. 1) використовується п'ятиступенева механічна коробка передач автомобіля «ЗІЛ-130». Це дає можливість одержання п'яти значень частоти обертів гальмівного диска: 210; 360; 640; 1006; та 1480 об/хв, що відповідає, з урахуванням шляху тертя, швидкості руху потяга у 43; 74; 133; 208 та 307 км/год відповідно (у перерахунку на залізничні колеса діаметром 1,05 м).

Зазначені вище характеристики елементів важільної системи стенда зведено у табл. 1.

При проведенні експериментів сила тертя взаємодії елементів дискового гальма визначалась опосередковано за допомогою виміру деформацій пружного елемента, яка спостерігалась у результаті прикладення зусилля. Деформація вимірювалась за допомогою мікрометричного індикатора часового типу (далі мікрометричним індикатором) ІЧ-10 (ДСТ 577-68, діапазон вимірювання $0 \dots 0,01$ м, ціна поділки $0,01 \cdot 10^{-3}$ м, межа основної похибки, що допускається, $\pm 20 \cdot 10^{-6}$ м) окремо для кожної гальмівної накладки.

Таблиця 1

Характеристики важільної системи навантаження експериментального стенда

Довжина важеля, м	a	b	c	d
	0,10	0,43	0,37	0,37
	Сумарна маса важелів, кг		Передаточне число	
	0,70		33,0	

Мікрометричний індикатор з'єднаний безпосередньо з гальмівною накладкою, у яку з діаметрально протилежної сторони упирається пружний елемент. Причому повздовжня вісь вимірювального стержня мікрометричного індикатора направлена паралельно поверхні гальмівного диска.

Таким чином, сила тертя, що виникає між накладкою та гальмівним диском, призводить до деформації пружного елемента (стисненню пружини), яка вимірюється мікрометричним індикатором. Величина вказаної сили тертя для однієї гальмівної накладки визначається як:

$$F_{\text{тр}} = C \cdot \varphi \cdot 10^{-5} = 1,2 \cdot \varphi; \quad [\text{H}], \quad (3)$$

де $C = 1,2 \cdot 10^5$ Н/м – жорсткість пружини пружного елемента системи вимірювання сили тертя експериментального стенда;

φ – показання мікрометричного індикатора у поділках (1 поділка відповідає $1 \cdot 10^{-5}$ м).

Відповідну тарувальну характеристику мікрометричного індикатора, що використовується для визначення сили тертя, наведено на рис. 2.

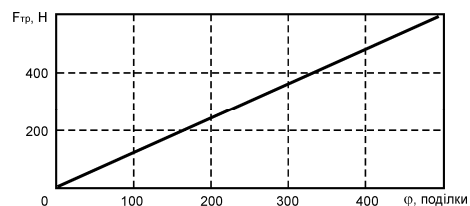


Рис. 2. Тарувальна характеристика мікрометричного індикатора

Для контролю температури поверхонь тертя використовувався безконтактний інфрачервоний термометр UT-300В (далі інфрачервоний термометр), який нерухомо закріплюється за допомогою штатива на відповідній відстані від досліджуваної поверхні.

Націлювання на зазначену поверхню відбувається за допомогою лазерного цілківказівника, що вбудовано у пристрій. Інфрачервоний термометр дозволяє дистанційно вимірювати температуру у діапазоні: $-18 \div 380 \text{ }^\circ\text{C}$, з межею основної похибки $\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ (за температурою навколишнього середовища $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$) у режимі реального часу (час відгуку 0,5 с) з роздільною здатністю $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Коефіцієнт випромінювання дорівнює 0,95. Оптична роздільна здатність відповідає відношенню 10 до 1, тобто лінійна відстань (D) до поверхні, що досліджується, відноситься до площі плями (S), температура якої визначається як $D/S = 10/1$.

Для вимірювання величини мас, що навантажує важільну систему експериментального стенда, використовувались портативні електронні ваги з межею основної похибки $\pm 0,01 \text{ кг}$ (у діапазоні від 0,01 до 40 кг та нормальних зовнішніх умовах).

У процесі експерименту контролювалися такі параметри:

- частота обертів гальмівного диска;
- навантаження важільної системи;
- деформація пружного елемента;
- температура в зоні контакту робочих елементів.

Діапазон значень кінцевих параметрів, що використовувались при проведенні експерименту, а також допоміжні величини, наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Значення параметрів, що варіювалися у процесі експериментальних досліджень

Назва параметра	Значення
Частота обертів гальмівного диска, об/хв (відповідна кутова швидкість, рад/с)	210; 360; 640; 1006; 1480 (22,0; 37,7; 67,0; 105,4; 155,0)
Сила нормального притиску накладки до гальмівного диска, Н	290; 462; 751; 1046; 1336; 1509; 1683
Розрахунковий номінальний тиск у контакті накладки з гальмівним диском, кПа	87,8; 139,9; 227,7; 317,0; 404,8; 457,4; 510
Маса ваг, які використовувались у процесі окремого дослідження з урахуванням маси важелів, кг	1,67; 2,66; 4,33; 6,03; 7,70; 8,70; 9,70
Комбінації матеріалів пари тертя накладка – гальмівний диск	чавун – сталь; вуглець – сталь; чавун – вуглець – сталь

Кожний окремий замір сили тертя проводився при сталому режимі роботи стенда. Контрольовані параметри фіксувались після того, як стабілізувалась температура відповідних фрикційних поверхонь, що визначалось за допомогою інфрачервоного термометра. Час температурної стабілізації становив, залежно від умов проведення експерименту, від 10 до 15 хвилин. Максимальна температура, при досягненні якої припинявся дослід, становила $360 \text{ }^\circ\text{C}$ (це обумовлено здатністю стенда поглинати і розсіювати тепло, а також обмеженнями термостійкості чавуну, що використовувався як один з фрикційних матеріалів).

Кожен з дослідів виконувався окремо і незалежно від інших. Для створення однакових умов проведення експериментів дослідний стенд (його фрикційний вузол – гальмівний диск з накладками) перед кожним вимірюванням охолоджувався до температури навколишнього середовища.

Для синхронізації зчитування даних з приладів, та їх прив'язки до часу випробування, використовувалась відеозйомка, у процесі якої циферблати обох мікрометричних індикаторів та дисплей інфрачервоного термометра одночасно знаходились у полі зору відеокамери, що записувала їх показання у процесі експерименту.

Температура навколишнього повітря під час досліджень знаходилась у межах $24 \dots 27 \text{ }^\circ\text{C}$, атмосферний тиск: 753 мм.рт.ст., вологість повітря: 58 %.

Одержані шляхом експериментальних досліджень залежності коефіцієнта тертя між накладками та гальмівним диском від середньої поверхневої температури, наведено на рис. 3-5. Експериментальні значення величин показано на графіках окремими точками (одержані шляхом осереднення серії паралельних вимірів).

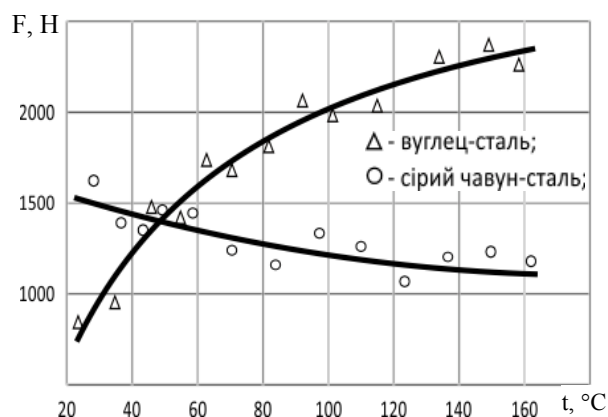


Рис. 3 Сила тертя у сполученні накладка – гальмівний диск у залежності від середньої поверхневої температури; контактний тиск: 0,3 МПа

Наведені графіки температурних залежностей не містять довірчих інтервалів, оскільки їх величини не перевищують розмір маркера точки (в обраному масштабі), замість цього на них відображено кожне

з експериментальних значень, що одержані при паралельних дослідях.

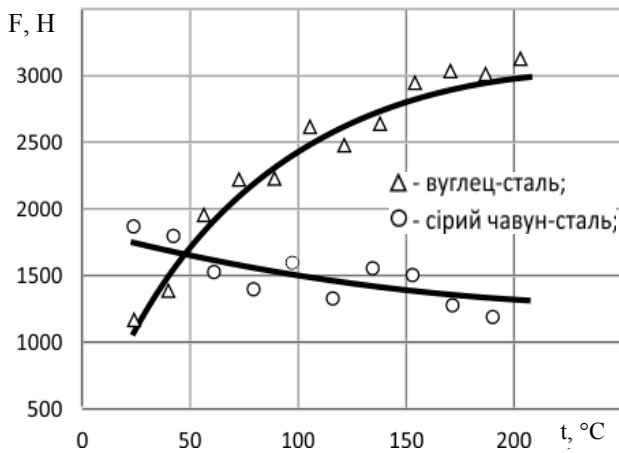


Рис. 4. Сила тертя у сполученні накладка – гальмовий диск у залежності від середньої поверхневої температури; контактний тиск: 0,4 МПа

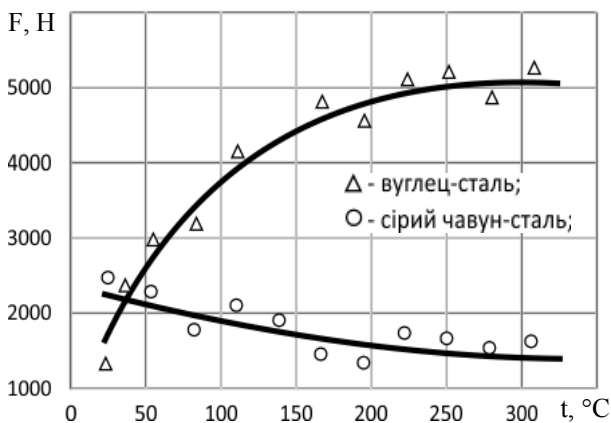


Рис. 5. Сила тертя у сполученні накладка – гальмовий диск у залежності від середньої поверхневої температури; контактний тиск: 0,5 МПа

Одержані значення експериментальних величин перевірено на відсутність грубих помилок за допомогою критерію Граббса.

Висновки:

1. Температура, яка генерується у зоні контакту фрикційних елементів є головним чинником впливу на силу тертя дискового гальма.

2. Сила тертя при взаємодії сполучення «вуглець - сталь» та «чавун - сталь» зі збільшенням температури має протилежні тенденції щодо зміни (сила тертя вуглецю зі зростанням температури збільшується, чавуну – зменшується).

Література

1. Biloborodova I., Sosnov I., Sergienko O. On contact thermal resistance in the system of active effective cooling of the locomotive disk brake. // TEKA Commission of

Motorization and Agriculture. Lublin, Polska Akademia nauk Oddzial w Lubline, 2010. - Vol. XB. - P. 362-370.

- Osenin Yu.Yu. Forced cooling of friction elements of disc brake: Europe's braking conference & exhibition ["EuroBrake 2014"] (13 – 15 May. 2014), EuroBrake 2014. – Lille (FRANCE), 2014. – P. 315 – 323.
- Osenin Yu., Sosnov I., Sergienko O. Creation method of frictional properties of the disc brake: Europe's braking conference & exhibition ["EuroBrake 2013"] (17 – 19 June. 2013), EuroBrake 2013. – Dresden (GERMANY), 2013. – P. 238 – 244.
- Yuriy Yu. Osenin, Igor Sosnov. Mathematical modeling unstationary friction interaction of working elements disc brake locomotive. // TEKA Commission of Motorization and power industry Agriculture and the Volodymir Dahl East-Ukrainian National University of Lugansk. – Lublin, 2011. – Vol. XI. B. – P. 111 – 120.
- Справочник по триботехнике / Под общ. ред. М. Хебды, А.В.Чичинадзе. В 3 т. Т.1. Теоретические основы. – М.: Машиностроение, 2000. – 411 с.
- Триботехника / Д.Н. Гаркунов, Э.Л. Мельников, В.С. Гаврилюк. – М.: КНОРУС, 2013. – 408 с.
- Осенін Ю.Ю., Сергієнко О.В., Соснов І.І., Бугаєнко В.В., Погребнова Н.Є. Стенд для дослідження взаємодії робочих елементів дискового гальма. Патент на корисну модель № 79205; Заявл. 15.11.2012; Дата опубл. 10.04.2013, Бюл. № 7.
- Osenin, Yu., Biloborodova, I., Sosnov, I., Sergienko O. Heat abstraction from contact zone of working elements of disc brake. // TEKA Commission of Motorization and Agriculture. Lublin, Polska Akademia nauk Oddzial w Lubline, 2014. - Vol. 14. - No. 2. - P. 79 - 85.

References

- Biloborodova I., Sosnov I., Sergienko O. On contact thermal resistance in the system of active effective cooling of the locomotive disk brake. // TEKA Commission of Motorization and Agriculture. Lublin, Polska Akademia nauk Oddzial w Lubline, 2010. - Vol. XB. - P. 362-370.
- Osenin Yu.Yu. Forced cooling of friction elements of disc brake: Europe's braking conference & exhibition ["EuroBrake 2014"] (13 – 15 May. 2014), EuroBrake 2014. – Lille (FRANCE), 2014. – P. 315 – 323.
- Osenin Yu., Sosnov I., Sergienko O. Creation method of frictional properties of the disc brake: Europe's braking conference & exhibition ["EuroBrake 2013"] (17 – 19 June. 2013), EuroBrake 2013. – Dresden (GERMANY), 2013. – P. 238 – 244.
- Yuriy Yu. Osenin, Igor Sosnov. Mathematical modeling unstationary friction interaction of working elements disc brake locomotive. // TEKA Commission of Motorization and power industry Agriculture and the Volodymir Dahl East-Ukrainian National University of Lugansk. – Lublin, 2011. – Vol. XI. B. – P. 111 – 120.
- Khebda, M., Chichinadze, A.V. Reference book on tribotechnology. Theoretical foundations, V.1, Engineering industry, 2000. – p. 411.
- Garkunov, D., Melnikov, E., Gavrilyuk, V. Tribotechnology, M.: KNORUS, 2013. – p. 407.
- Osenin Yu.Yu., Sergienko O.V., Sosnov I.I., Bugaenko V.V., Pogrebnova N.E. Test Bench for Researching Interaction of Working Elements of Disc Brake. Utility model No. 79205; Date of application 15.11.2012; Date of issue 10.04.2013, Bulletin No. 7.
- Osenin, Yu., Biloborodova, I., Sosnov, I., Sergienko O. Heat abstraction from contact zone of working elements of disc brake. // TEKA Commission of Motorization and

Agriculture. Lublin, Polska Akademia nauk Oddzial w Lubline, 2014. - Vol. 14. - No. 2. - P. 79 - 85.

Доума Мансур Аль-Махди, Осенин Ю.Ю., Сергиенко О.В. Зависимость силы трения дискового тормоза от средней температуры фрикционного контакта

В статье установлена зависимость силы трения дискового тормоза от температуры, которая генерируется в зоне фрикционного контакта в результате силового взаимодействия тормоза. Показано, что сила трения при взаимодействии элементов «углерод-сталь» и «чугун-сталь» имеют противоположные тенденции при увеличении температуры (сила трения для углерода увеличивается с ростом температуры, для чугуна уменьшается). Получило дальнейшее развитие представление о зависимости изменения силы трения для соединений «углерод-сталь» и «чугун-сталь» в условиях влияния температуры.

Учет закономерности зависимости силы трения дискового тормоза от температуры на конструкторско-технологической стадии создания дискового тормоза позволяет повысить его надежность и обеспечить трудоспособность.

Ключевые слова: подвижной состав, дисковый тормоз, сила трения, фрикционные материалы, зависимость.

Douma Mansur Al-Mahdy, Osenin Yu. Yu., Sergienko O. V. Dependence of the friction force of disc brake on the average temperature of frictional contact

The article founds the dependence of friction force of disc brake on the temperature generated in the friction contact zone as a result of friction interaction of disc working elements. It demonstrates that friction force of combinations "carbon-steel" and "iron-steel" has opposite tendencies as the temperature rises (force friction increases with temperature for carbon and decreases for iron). There is further development of concept of dependence of friction force change for combinations "carbon-steel" and "iron-steel" under the influence of temperature.

Accounting of dependence of friction force of disc brake on the temperature at the design-engineering stage of creating disc brake allows increasing its reliability and providing operation capacity.

Key words: rolling stock, disc brake, friction force, friction materials, dependence.

Доума Мансур Аль-Махді – аспірант кафедри гідрогазодинаміка Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.

Осенин Ю.Ю. – к.т.н., доцент кафедри гідрогазодинаміка Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, osenin_yu_yu@ukr.net

Сергієнко О.В. – к.т.н., доцент, доцент кафедри графічного та комп'ютерного моделювання Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, sergienko.o.v@gmail.com

Рецензент: **Марченко Д.М.**, д.т.н., професор

Стаття подана 22.10.2015.