

УДК 621.921

СУЧАСНІ ФРИКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

Олександр Добровольський¹, Валерій Косенко²

¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
03680, Воздухофлотський проспект, 31, Київ, Україна, e-mail: dobrovolsky34@ukr.net
²Університет "Україна", вул. Львівська, 23, Київ, Україна, e-mail: ukraine.vdk@mail.ru

MODERN FRIKTION MATERIAS

Alexander Dobrovolsky¹, Valeriy Kosenko²

¹Kyiv National University of Construction and Architecture,
03680, Povitroflotsky Avenue 31, Kyiv, Ukraine, e-mail: dobrovolsky34@ukr.net
²University "Ukraine", 03115, vul. Lvivska, 23, Kyiv, Ukraine

АНОТАЦІЯ. Наведені характеристики сучасних фрикційних матеріалів, які були отримані, досліджені і останнім часом застосовуються для виготовлення деталей, що працюють в умовах фрикційного тертя та зношування.

Ключові слова: зносостійкі, фрикційні матеріали, зносостійкість, тертя та зношування.

АННОТАЦИЯ. Приведены характеристики современных фрикционных материалов, которые были получены, исследованы и в последнее время применяются для изготовления деталей, эксплуатируемых в условиях трения и износа.

Ключевые слова: износостойкие, фрикционные материалы, износостойкость, трение и износ.

ABSTRACT. Purpous. Results of research of characteristics of modern friction materials. Methodology / approach.. Results obtained by analyzing publications in the technical literature. **Finding.** Characteristics of modern friction materials, including materials based on asbestos and non-asbestos, based on copper, aluminum, iron and their alloys, carbon-based composite materials and other materials. **Reserch lemitation / implication.** Show application of friction materials depending on operating conditions. **Originating / volue / Creation.** New friction materials should be more common.

Key words: Friction materials, wear resistance, friction and wear.

ВСТУП

Техніка неухильно йде по шляху збільшення потужності і швидкості механізмів і машин, тому питання гальмування так важливі в рішенні технічних завдань. Гальмівні вузли в машинах переречно визначають надійність і довговічність їх роботи, а в багатьох випадках (авіація, автомобільний транспорт) і безпеку.

У гальмівних механізмах використовуються фрикційні матеріали [1-3]. Вони призначені для роботи в різних гальмівних і передавальних вузлах автомобілів, гусеничних машин, дорожніх і будівельних механізмів, літаків, верстатів, пресів тощо. Фрикційні матеріали працюють у важких умовах зношування за високих питомих навантажень (до 8 МПа), швидкостей ковзання (до 50 м/с) і температур, що можуть миттє-

во підвищуватися до 1200°C і більше. Механічна енергія рухомих елементів під час гальмування переходить у теплову, а потім розсіюється. Тепловий вплив паралельно з багаторазовими циклічними навантаженнями, нагріванням і охолодженням, термічними і силовими деформаціями, утворенням градієнта температур істотно впливають на кінетику тертя і зношування фрикційних матеріалів. В зв'язку з цим вони повинні володіти високою фрикційною теплостійкістю (здатністю зберігати високий коефіцієнт тертя і зносостійкість в широкому діапазоні температур), не повинні при терті схоплюватися (як би «прилипати» один до одного), високою теплопровідністю і теплоємністю, стійкістю проти теплового удару, що виникає в результаті інтенсивного виділення тепла в процесі тертя. Пред'являються також вимоги до корозій-

ної стійкості, технологічності, економічності. Їх виготовляють у вигляді дисків, секторних накладок, колодок різної конфігурації тощо.

МЕТА РОБОТИ

Велика розмаїтість конструктивних типів вузлів фрикційного тертя, а також умов експлуатації, вказують на неможливість створити універсальний фрикційний матеріал, здатний працювати у вузлах тертя різного призначення. Ці обставини привели до необхідності створення найрізноманітніших фрикційних матеріалів, характеристики яких з врахуванням умов тертя, надані в цій роботі. Вони можуть бути корисними при конструюванні, виготовленні та експлуатації фрикційних вузлів тертя машин і механізмів.

ВИКЛАД МАТЕРІАЛУ

В залежності від умов експлуатації та конструкційних особливостей всі фрикційні матеріали поділяють на матеріали азбестові та безазбестові. За складом фрикційні матеріали поділяють на неметалеві, наприклад, полімерні, металеві, композиційні матеріали, серед яких виділяється група на основі вуглецю (армовані вуглець-вуглецеві фрикційні матеріали). Виділяють також групу порошкових фрикційних матеріалів на основі мідних, залізних і алюмінієвих сплавів,

Розрізняють фрикційні матеріали для велими легких (температура на поверхні тертя нижче 100°C і в обсязі тіла не вище 50°C), легких (відповідно 250 і 150°C), середніх (відповідно 600 і 350°C), важких (відповідно 1000 і 600°C) і надважких (відповідно більше 1000 і 600°C) умов експлуатації [4]. Припустимі значення температур поверхні тертя для різних фрикційних матеріалів наведені на рисунку. За умовами експлуатації фрикційні матеріали можуть працювати як при сухому терті (наприклад гальмівні накладки фрикційних механічних пресів, колодки автомобільних гальм), так і в умовах рідкого мастила. (наприклад в автоматичних коробках передач сучасних ав-

томобілів з фрикційними дисками і гальмівними стрічками).

Пара тертя в гальмівних пристроях в основному складається з гальмівного диска і гальмівних накладок. Гальмівні диски виготовляють зазвичай з сірого, високоміцного, ковкого чавунів або сталі, титанових сплавів, композиційних сплавів. Частіше використовують чавуни, які не беруться до викривлення, температура при їх використанні не повинна перевищувати 600°C. При більш високому показнику температури коефіцієнт тертя чавуну значно падає, що згубно позначається на механізмах. Перелік матеріалів для дисків невеликий. Широке поширення в машинобудівній галузі отримали також диски, що становлять сталеву несучу основу з нанесеним з двох сторін фрикційним шаром. На даний момент існує велика кількість способів отримання таких фрикційних дисків (напикання, напилення, електроформування, накатка та інші).

Ще більший інтерес становлять гальмівні колодки, накладки і т.п., які в процесі роботи зношуються, після чого замінюються на нові. Матеріали для їх виготовлення розроблені у великій кількості. Склад цих матеріалів в основному є закритою частиною виробництва і в технічному друку майже не публікується [5].

Виділяють такі матеріали колодок: композити з полімерними матрицями, металеві композиції, порошкові матеріали, матеріали з вуглецю або вуглецевої композиції, матеріали з керамічними матрицями.

Фрикційні композити з полімерною матрицею, як правило, містять чотири типи компонентів: полімерні смоли або сполуки, абразивні наповнювачі, модифікуючі та армуючі домішки (волокна, повсть, сітки тощо). Ці матеріали виготовляють з використанням азбестових, базальтових, вуглецевих та інших волокон. Сполучними в цих матеріалах є каучук, смоли і їх поєднання; наповнювачами – кремнезем, залізний сурик, барит, MoS₂, оксиди хрому тощо. Додаються також порошкоподібний кокс, графіт, технічний вуглець. Для підвищення теплопровідності вводяться порошки та стружка з міді, латуні, цинку, алюмінію, заліза тощо.

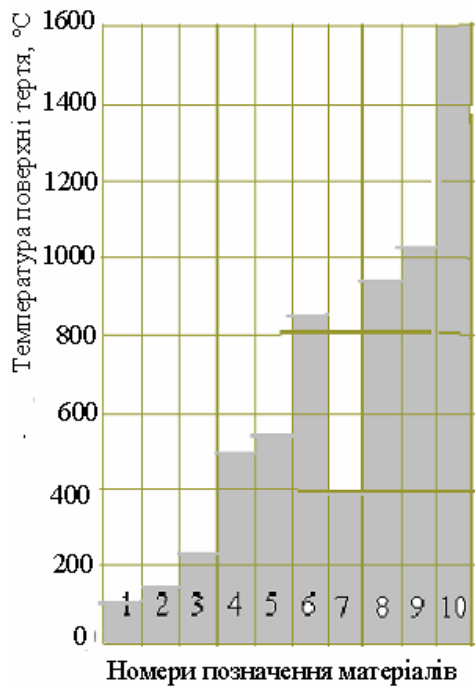


Рисунок. Припустимі значення температур поверхні тертя для різних фрикційних матеріалів: 1 – шкіра, картон, пробка; 2 – деревина; 3 – полімерні матеріали на основі каучуку, спечені порошкові матеріали на основі алюмінію; 4 – полімерні матеріали на комбінованому сполучному; 5 – полімерні матеріали на смоляному сполучному; 6 – полімерні матеріали на смоляному сполучному після термічної обробки; 7 – спечені порошкові матеріали на основі міді; 8 – чавун; 9 – спечені порошкові матеріали на основі заліза; 10 – композиційні матеріали на основі вуглецю

Figure. Acceptable values of the temperatures of the friction surface for various friction materials: 1 – leather, cardboard, cork; 2 – wood; 3 – rubber-based polymer materials, sintered powder materials based on aluminum; 4 – polymer materials on the combined bond; 5 – polymer materials on resin bonding; 6 – polymeric materials on the resin bond after thermal treatment; 7 – sintered copper fowl materials; 8 – cast iron; 9 – sintered powder materials based on iron; 10 – carbon-based composite materials

До матеріалів з полімерною матрицею відносяться матеріали на основі азбесту, які досі широко виготовляють на підприємствах України [6]. Елементарні волокна азбесту мають вигляд трубок з зовнішнім діаметром близько 32 нм і внутрішнім 2,6 нм, тобто в поперечному напрямку волокно має розміри, характерні для наноматеріалів. Середня довжина волокна становить 1.3мм. Волокна азбесту мають високу міцність на розтягнення (до 3 ГПа), що набагато перевищує міцність сталі. Азбест має високий

коефіцієнт тертя (до 0.8), який слабо змінюється в залежності від температури. Міцність волокон при нагріванні до 400°C знижується всього на 20%. При 800°C спостерігається його руйнування. Таким чином, азбест ніби спеціально створений як основа для фрикційного матеріалу. Однак, у азбесту є і істотний недолік. Він вважається екологічно небезпечним матеріалом. Потрапляючи з повітря у вигляді пилу в легені людей і тварин, його волокна вражають органи дихання. Вони можуть стати центрами утворення ракових клітин.

При виготовленні азбестових фрикційних матеріалів в основному застосовують мастильне і бітумно-мастильне сполучне, каучук і фенол-формальдегідні смоли.

Мастильне сполучне забезпечує високу еластичність матеріалу, однак не забезпечує високої міцності. Максимальна робоча температура не перевищує 200°C.

Матеріали на каучуковому сполучному мають досить високий коефіцієнт тертя і зносостійкість. Однак, при підвищенні температури вище 200...250°C коефіцієнт тертя і зносостійкість помітно знижуються. Робоча температура азбокаучуку не перевищує 250°C. Застосовують такі азбокаучуки: КХ 1; 6 КФ-32; 6 КВ-10; 6 КХ-15 і ін.

Матеріали на основі терморективних смол – азбосмоляні (КФ-3М, К15-6, К15-ВМ, ФК-16Л, ФК-24А) мають більшу теплостійкість, але нестабільний коефіцієнт тертя, крихкість. Найкращий результат досягається при спільному використанні смол і каучуків. Невдале поєднання сполучних через нестабільність коефіцієнта тертя призводить до виникнення автофрикційних коливань (скрип і вереск гальм). Прикладом комбінованого матеріалу, що містить як сполучне каучук і смоли, може бути 7КФ-31.

З азбосмоляних матеріалів найкращим є ретинакс. Він витримує температуру на поверхні до 1000°C, має досить стійкий коефіцієнт тертя. Ретинакси ФК-24А і ФК-16Л містять 25% фенолоформальдегідної смоли, 40% азбесту, 35% бариту, рублену латунь і пластифікатор. У парі зі сталлю ретинакс забезпечує коефіцієнт тертя 0,37...0,40. Його використовують у гальмі-

вних пристроях літаків, автомобілів та інших машин.

Залежно від способу виготовлення азбестові матеріали можуть бути ткані, формовані, пресовані і вальцьовані

Істотним недоліком фрикційних азбестовмісних матеріалів є їх низька температура розпаду, за якої вони здатні взаємодіяти з чавуном або сталлю (іншим елементом пари тертя), утворювати карбіди і пересичені тверді розчини.

У країнах Європи з 1989 року заборонено використання азбесту. Спроби замінити азбест волокнами зі скла, шлаку, бору, вуглецю хоча і не дали такого ж ефекту, як азбест, але їх застосовують для створення фрикційних матеріалів. Успішно замінюють азбест такими матеріалами як базальт, арамід, кевлар, вуглецеві волокна. Арамідні, кевларові і вуглецеві волокна є дорогими матеріалами. Їх застосовують винятково в дорогих дрібносерійних автомобілях, в авіації та об'єктах військової техніки.

Використання базальтових волокон для армування є одним з альтернативних шляхів вирішення проблеми створення безазбестових виробів фрикційного призначення. Порівняльні випробування показали, що полімерні композиції, що містять базальтові волокнисті наповнювачі, за зносостійкістю знаходяться на рівні композитів, армованих азбестом, а за коефіцієнтом тертя перевершують їх [7]. Базальтові волокна мають також перевагу за жаростійкістю і жароміцністю, що дозволяє композиту працювати в більш високому температурному інтервалі. Базальт є екологічно чистим і не виділяє шкідливих речовин, в тому числі і при підвищених температурах. Розроблено технологія виробництва базальтового волокна і виробів з них [8, 9]. В Україні виготовляють безазбестові фрикційні матеріали на підприємствах "Флексін Україна", Білоцерківському підприємстві П.П. Шинкаренка та інших.

До металевих фрикційних матеріалів відносять чавуни і сталі різних марок. Їх використовують в незамінних або рідко замінних елементах гальмівних і фрикційних пристроїв як контртіла (силові диски, барабани, шайби і т.п.). Основні недоліки цих

фрикційних матеріалів – нестабільність коефіцієнта тертя при різкій зміні температури, схильність до схоплювання третюю поверхню; вони поступово замінюються неметалевими фрикційними матеріалами.

До металевих можна віднести також *порошкові (металокерамічні) фрикційні матеріали*, які застосовують у важких режимах тертя. Їх виготовляють шляхом формування порошків у заготовки, спікання заготовок при підвищених температурах і, якщо треба, подальшої механічної обробки. Вони призначені для роботи в різних гальмівних і передавальних вузлах літаків, автомобілів, гусеничних машин, дорожніх і будівельних механізмів, верстатів, пресів і т.п.

Всі компоненти, що входять до складу спечених порошкових фрикційних матеріалів умовно можна поділити на три категорії: матеріали основи; матеріали мастила, які зберігають фрикційний матеріал від надмірного зносу, і матеріали, які надають високі фрикційні властивості. В основному виготовляють порошкові матеріали на основі міді і на основі заліза.

До матеріалів основи входять мідь, залізо, алюміній, олово та інші легуючі домішки.

Для підвищення коефіцієнта тертя додаються в невеликій кількості порошки кремнію, двоокису кремнію (SiO_2), (іноді азбесту) і ін. Свинець, олово, сурма, графіт, сульфід молибдену, заліза або міді, сірчанокислі солі барію і заліза, нітрид бору виконують роль мастила. Вони оберігають фрикційний матеріал від надмірного зносу і заїдання.

Сумарний вміст фрикційних домішок (оксиди кремнію, алюмінію, заліза; нітриди бору, магнію, марганцю, хрому, титану; карбіди бору, силіциди заліза, муллит; ситал; чавун тощо) складає 5...10% в матеріалах для роботи при порівняно низьких температурах; 10...15% в матеріалах, що застосовуються у середньонавантажених вузлах; 15...25% і більше в матеріалах, що працюють при високих температурах (1000°C і вищих).

Фрикційні сплави відрізняються невисокою міцністю, тому їх застосовують у вигляді тонкого шару на сталевому диску або

на сталевій стрічці. З'єднання їх зі сталлю проводиться різними способами, наприклад, припиканням порошкового сплаву до сталі.

Фрикційні матеріали залежно від умов роботи поділяють на дві групи: матеріали, що працюють в умовах сухого тертя і матеріали, що працюють в мастилі.

Недоліком «сухих» фрикційних пристроїв, окрім підвищеного зношування, є різке зниження ефективності у випадку потрапляння мастила на поверхню тертя дисків від деталей, що сильно змащуються і які розміщені у безпосередній близькості, наприклад, від підшипників, шестірень, валів тощо.

Для роботи з мастилом використовуються фрикційні матеріали у таких пристроях: фрикціони, електромагнітні муфти, синхронізатори, муфти граничного моменту гідротрансмисій і т.п. Їх використання дозволяє підвищити довговічність, надійність і ефективність фрикційних вузлів машин і механізмів, створити нові конструкції фрикційних вузлів з стабільним коефіцієнтом тертя, високою зносостійкістю і термостійкістю пари тертя. Основні переваги мастильних фрикційних пристроїв полягають у плавності вмикання, легкості та надійності охолодження, спрощенні герметизації. Недоліком цих пристроїв є зниження фрикційної ефективності. Динамічний коефіцієнт тертя спечених фрикційних матеріалів в умовах змащування становить максимум 0.08...0.10, тобто він значно нижчий від коефіцієнта тертя без мастила. Внаслідок цього виникає необхідність компенсації коефіцієнта тертя матеріалу збільшенням діаметра дисків, їх кількості або підвищенням питомого навантаження на поверхні тертя. Найчастіше вдаються до підвищення тиску у фрикційних пристроях до 6...8 МПа. Порошкові спечені матеріали в мастилі у пристроях можуть працювати за швидкостей до 100 м/с, а в окремих випадках і вищих.

Металевою основою *порошкових фрикційних матеріалів на основі міді* зазвичай служать олов'янисті і алюмінієві бронзи. Вони призначені переважно для роботи в умовах тертя з середньовуглецевими ста-

лями з твердістю HRC 40-45 при тиску до 35 МПа і швидкості ковзання до 50 м/с. Застосування їх обмежується вузлами, в яких температура на поверхнях тертя не перевищує 300 °С. Їх застосовують для роботи в умовах тертя без мастила і з мастилом.

Завдяки високій зносостійкості і досить високому коефіцієнту тертя добре зарекомендували себе в гальмівних і передавальних пристроях різного призначення матеріали на основі олов'янистої і алюмінієвої бронзи. Порівняно з матеріалами на основі заліза вони менше стирають сполучену деталь, виготовлену з чавуну або сталі.

В електромагнітних муфтах фрезерних верстатів, гальмах вулканізаторів-форматорів і фрикційних пар торових варіаторів швидкостей застосовуються порошкові спечені матеріали на основі алюмінієвої бронзи. Заміна текстоліту на цей матеріал дає змогу збільшити термін експлуатації фрикційної пари у 15 разів.

Матеріали на основі олов'янистої бронзи можуть вміщувати 62...86% міді, 5...10% Sn, 5...10% Pb, до 2% Fe, 4...8% C (графіту), до 3% Si₂, до 2% Ni, 0,75% Si. Їх застосовують у гальмівних пристроях, що працюють як без мастила, так і з мастилом.

На основі олов'янистої бронзи великого поширення набув матеріал марки МК-5, який при роботі без мастила має коефіцієнт тертя 0.16...0.32, його максимальна робоча температура може сягати 300...350°С. В автомобіле- і тракторобудуванні з цих матеріалів виготовляють гальмівні диски, колодки і накладки для муфт зчеплення.

Матеріал марки МК-5 застосовують також у фрикційних пристроях, що експлуатуються в умовах мастильного середовища. Коефіцієнт тертя цього матеріалу залежно від умов роботи коливається в межах 0.04...0.07. Крім матеріалів типу МК-5 застосовують композити, які містять домішки муліту, бентоніту й азбесту, що за певних умов характеризуються вищими коефіцієнтами тертя, ніж матеріал МК-5.

Для роботи в умовах змащування можна рекомендувати фрикційні матеріали на основі алюмінієвої (ФАБ) або алюмінієво-олов'янистої (типу ФАБО) бронзи.

Порошкові матеріали на основі заліза

призначені для роботи в умовах сухого тертя при важких режимах (температурі поверхні тертя до 1000°C, тиску до 6 МПа при швидкостях до 60 м/с) в парі з чавуном або легованою сталлю в гальмівних пристроях різної конструкції. Їх застосовують для оснащення таких вузлів, як дискові гальма, муфти зчеплення автомобілів, фрикційні вузли різних приладів, рідше – для колодок і стрічкових гальм деяких передавальних пристроїв. У порівнянні з азбофрикційними матеріалами вони володіють більш високими значеннями термо- і зносостійкості (в 2...4 рази), а в деяких випадках, наприклад, при роботі в парі з легованим чавуном, більш високим коефіцієнтом тертя (наприклад, у матеріалів марок ФМК-8, ФМК-11, МКВ-50А і СМК коефіцієнт тертя складає 0,7...0,9).

Крім основи і металевих компонентів (Sn, Pb, Ni і ін.), що забезпечують міцність, високу теплопровідність і зносостійкість, ці матеріали містять неметалеві домішки азбесту, граніту, оксидів кремнію, сульфідів, нітридів, карбідів.

У багатодисковій гальмівній системі літаків застосовують берилій через його високу теплоємність, теплопровідність і малу щільність.

Вуглець-вуглецеві композиційні матеріали. Для роботи в надважких умовах тертя, за високих температур використовують вуглець-вуглецеві композиційні матеріали (ВВКМ), отримані на основі вуглецевої матриці і вуглецевих волокнистих наповнювачів. Сутність технологічного процесу отримання ВВКМ полягає у створенні армувального каркаса і уведенні в нього вуглецевої матриці.

Причини заміни одних матеріалів іншими зумовлені обмеженнями припустимих температур експлуатації матеріалів, зумовлених їх природою. За температур понад 350°C починається деструкція полімерів. Якщо температура на робочих поверхнях порошкових фрикційних дисків перевищує 1000°C, відбувається їх схоплювання з матеріалами контртіла. Робочий діапазон температур вуглецевих матеріалів значно ширший і вони працездатніші за поверхневих температур понад 1600...2000°C. Одні-

єю з найважливіших переваг вуглецевих матеріалів є їх мала маса.

Вуглецеві диски застосовують в авіації, в автомобілях класу «Формула-1». Їх застосовують і в інших спортивних та великовантажних автомобілях, а також в мотоциклах, високошвидкісному залізничному транспорті.

Слід зазначити, що ВВФМ чутливі до умов зовнішнього середовища, зокрема, вологості, коли виявляється ефект, сутність якого полягає в зменшенні гальмівного моменту після тривалої стоянки літака, особливо в умовах підвищеної вологості, і зумовлений наявністю у вуглецевих матеріалах залишкової пористості. Атмосферна волога потрапляє в пори матеріалів, а потім у процесі фрикційного нагрівання пара води, адсорбуючись на робочих поверхнях, полегшує тертя і знижує коефіцієнт тертя до неприпустимих значень. Властивий матеріалу коефіцієнт тертя відновлюється після нагрівання до 120...150°C. Працездатність гальмівних пристроїв з фрикційними вуглецевими матеріалами також знижується у разі недотримання необхідних заходів поводження зі спеціальними рідинами. Коефіцієнт тертя у разі потрапляння на робочі поверхні дисків вологи знижується.

За високих температур вуглецеві композиції схильні до окиснення киснем повітря, яке починається за температури понад 500°C з виділенням газоподібних продуктів. Цей процес прискорюється з підвищенням температури і підсилюється наявністю доступних для кисню пор, що додатково розвиваються у міру окиснення. Спочатку окислюються бічні (неробочі) поверхні, а у міру збільшення кількості експлуатаційних циклів процес окиснення поширюється в поверхневі шари, які найбільше нагріваються, розпушуючи їх, що призводить до зниження міцності. У зв'язку з цим під час конструювання фрикційних вузлів необхідно забезпечити захист від проникнення і дифузії кисню. Використовуються технологічні і конструктивні методи, спеціальні покриття, захисні екрани на бічних неробочих поверхнях фрикційних елементів, спеціальні домішки до складу фрикційних матеріалів, що пригнічують активні

центри в реакціях з киснем.

Серед фрикційних матеріалів останнього покоління, які можуть використовуватися в високонавантажених системах гальмування, є матеріали з керамічною матрицею. Завдяки виключно високій твердості і стійкості до абразивного зносу поширення набули матеріали з карбідокремнієвою матрицею, що армовані вуглецевими або іншими типами волокон. Основними достоїнствами даних матеріалів є відносно мала щільність, що дозволяє зменшити вагу вузла; висока зносостійкість в різних середовищах; здатність поглинати велику кількість теплової енергії; висока стійкість до термічного удару; висока робоча температура (до 1000°C).

ВИСНОВКИ

Питання гальмування машин і механізмів в першу чергу залежать від властивостей фрикційних матеріалів, що працюють в найрізноманітніших умовах. У зв'язку з цим для кожної окремої конструкції гальмівного пристрою треба підбирати найбільш ефективний матеріал. Тому характеристики сучасних антифрикційних матеріалів із врахуванням умов роботи, що наведені в цій статті, можуть бути корисними при конструюванні вузлів тертя. Крім того, показано тенденції розвитку фрикційних матеріалів. Вказано також на необхідність усунення з виробництва азбестових фрикційних матеріалів як таких, що наносять шкоду здоров'ю людині.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Костецкий Б.И.* Трение, смазка и износ в машинах. – К.: Техника, 1970. – 395 с.
2. Сучасні аспекти трибології у транспортних засобах. Підручник /*В.А. Косенко, Н.Ф. Куцевська, О.Г. Добровольський, В.В. Малишев.* – К.: Університет “Україна”, 2016. – 356 с.
3. *Закалов О.В., Закалов І.О.* Основи тертя і зношування в машинах. Навчальний посібник. – Тернополь: Видавництво ТНТУ ім. І. Пулюя, 2012. – 240 с.
4. *М. Хебда, А.В. Чичинадзе,* Довідник по триботехніке, т. 3, М., 1992.

5. *Norottam P. Bansel.,* Handbook of ceramic composites. – Kluwer Academe Publishers. – 2005. – 554 p.
6. *Гаршин А.П., Нилов А.С.* Анализ современных фрикционных материалов для тормозных колодок в высоконагруженных автомобильных системах торможения. Н. журнал Порошковая металлургия: Инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка. – Минск.: Беларуская навука. 2013. – 60 - 71 с.
7. *Бартенев Г.М., Лаврентьев В.В.* Трение и износ полимеров. – Л. Химия, 1972 - 240 с.
8. *Хренов О.В., Дмитрович А.А, Лешок А.В.,* Металлокерамические фрикционные материалы. Учебно-методическое пособие. – Минск.: БНТУ. 2011 - 42 с.
9. *Рогов В.А., Соловьев В.В, Копылов В.В.* Новые материалы в машиностроении: Учебное пособие. – М.: РУДН, 2008. – 324 с.

REFERENCES

1. *Kostetsky B.I.* 1970. Treniye, smaska i iznos v mashinah, Kyiv, Tekhnika. Publ., 395.
2. *Kosenko V.A, Kusthevska N.V., Dobrovolsky O.G., Malishev V.V.* 2016. Sutshasni aspekti tribologii v transportnih zasobah. Pidrutshnik. Kyiv, Univrsitet “Ukraina” Publ., 356.
3. *Zakalov O.V., Zakalov I. O.* 2012. Osnovi tertya i znoshuvannya v mashinah. Navtshalniy posibnik. Ternopol, TNTU Paulya Publ., 356. – (in Ukrainian).
4. *Hebda M., Tchitchinadze A.B.* 1992. Dovidnik po tribotechnike, Vol.3, Moscow, 285.
5. *Norottam P. Bansel.* 2005. Handbook of ceramic composites. Kluwer Academe Publishers, 554.
6. *Garschin A.P., Nilov A.S.* 2013. Analiz sovremennih friktsionnih materialov dlya tormoznih kolodok v visokonagruzenih avtomobilnih sistemah tormogeniya. N. zurnal Poroshkovaya metalurgiya: Indgeneriya poverchnosti, noviye poroshkovie kompozitsionnie materiali. Svarka, Minsk: Belaruskaya navuka, 60-71. – (in Russian).
7. *Bartenev G.M., Lavrentyev V.V.* Treniye i iznos polimerov, L. Chimiya, 240. – (in Rus.).
8. *Hrenov O.V., Dmmitrovitsh A.A., Leschok A.V.* 2011. Metalokeramitsheskie friktsionniye materiali. Utshebno-metoditsheskoe Posobiye. Minsk, BNTU, 42. – (in Russian).
9. *Rogov V.A., Solovyov V.V., Kopilov V.V.* 2008. Noviye materiali v maschinostroenii: Utchebnoye posobiye, Moscow, RUDN, 324. – (in Russian).