Лекція11

ТРИБОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

План

11.1. Антифрикційні матеріали

11.2. Фрикційні матеріали

11.3. Зносостійкі матеріали

11.4. Відновлювальні суміші для регенерації трибосистем

11.1. Антифрикційні матеріали

11.1.1. Вимоги до антифрикційних матеріалів

Антифрикційні матеріали призначені для виготовлення підшипників (опір) ковзання, що широко застосовуються в сучасних машинах і приладах завдяки стійкості до вібрацій, безшумності роботи, невеликим габаритам.

Основними властивостями антифрикційних матеріалів варто вважати антифрикційність і опір втомленості.

Антифрикційність – це здатність матеріалу забезпечувати низький коефіцієнт ковзання, незначні втрати на тертя і малу швидкість зношування сполучених деталей. Крім того, кожен матеріал у конкретних умовах роботи має бути, наприклад, стійким проти окиснювання за підвищених температур, мати високий опір корозії під час роботи в агресивних середовищах і т. ін. Ці матеріали мають працювати в широкому діапазоні швидкостей ковзання (від 0,001 до 100 м/с і більше), навантажень (від 1 м до 25 МПа і більше), температур до 100°С і більше.

Наведені відомості не дають змоги створити універсальний антифрикційний матеріал, здатний працювати у вузлах тертя різного призначення. Тож постає потреба в розробленні різноманітних матеріалів тертя для конкретних заданих умов роботи.

На тепер налічується безліч вузлів тертя, у яких застосовуються антифрикційні матеріали – циліндричні й кулькові підшипники, підп’ятники, вкладиші, напрямні, що ковзають, струмознімачі, торцеві й бічні ущільнення, шарнірні пристрої, поршневі кільця та ін.

Антифрикційні матеріали працюють у найрізноманітніших умовах, а саме: за граничного тертя, у вакуумі, тертя без змащення, еластогідродинамічного тертя, за підвищених температур, високих швидкостей, великих навантажень, у різних агресивних середовищах (воді, кислотах, лугах, розплавлених металах, розпечених газах), інертних газах та ін.

Основні вимоги до антифрикційних матеріалів такі:

- висока зносостійкість;
- низькі значення коефіцієнта тертя;
- оптимальна поверхнева й об’ємна міцність;
- припрацьовуваність;
- достатня в’язкість для унеможливлення крихкого руйнування;
- висока втомна міцність;
- здатність протистояти схоплюванню;
- достатня теплопровідність й оптимальні значення коефіцієнта теплового

розширення;

- наявність у матеріалі запасу твердого або рідкого мастила;
- технологічність виготовлення;
- економічність.

Крім цих вимог до матеріалів конкретного призначення, що працюють у специфічних умовах, потрібні спеціальні властивості. Наприклад, об'ємна міцність у матеріалах для важконавантажувальних вузлів тертя має бути досить високою, а матеріали для роботи в разі підвищених температур повинні мати стійкість проти окиснення.

11.1.2. Природа антифрикційності

Антифрикційність забезпечується такими властивостями підшипникового матеріалу:

1) високою теплопровідністю;
2) ефективним змащенням мастильним матеріалом;
3) здатністю створювати на поверхні захисні плівки;
4) задовільною припрацьовуваністю, що ґрунтується на здатності матеріалу в процесі тертя легкопластично деформуватись і збільшувати площу фактичного контакту, що сприяє зниженню місцевого тиску і температури на поверхні підшипника.

Згідно з І.В. Крагельським основною властивістю антифрикційної пари тертя (при цьому розглядаються пари тертя і взаємодія їх зі змащенням) є забезпечення додатного градієнта механічних властивостей за глибиною, що призводить до мінімальної роботи об'ємного деформування, а в разі пластичного деформування – до здатності багаторазово передеформовуватися, що не спричиняє окрихчування матеріалу.

Для досягнення додатного градієнта механічних властивостей користуються змащенням. Однак цього не досить, оскільки в разі розриву мастильного шару (за пускових режимів, перевантажень) відбувається взаємодія двох твердих поверхонь, яким необхідно забезпечити додатний градієнт механічних властивостей. Це можливо у випадках, коли на поверхні тертя будуть:

1) вторинні структури у вигляді оксидних плівок;
2) плівки перенесеного м'якого металу зі структурних складових пари тертя;
3) нанесені спеціальні легкоплавкі покриття.

Більшість антифрикційних матеріалів має композиційну структуру, а саме, тверді вкраплення рівномірно розподіляються в пластичній матриці, що відповідає правилу Шарпі. У процесі роботи такого підшипникового матеріалу тверді вкраплення сприймають навантаження і передають його м'якому сполученню – матриці, що завдяки високій пластичності набуває форми вала, знижуючи контактний тиск на виступи тертьових поверхонь.

Перспективною є ідея про можливості забезпечення нормальних умов ковзання за рахунок вибіркового перенесення м'якої складової сплаву з однієї поверхні на іншу. В цих умовах здійснюється робота пари тертя майже без зношування.

11.1.3. Критерії оцінювання підшипникових матеріалів

Критеріями для оцінювання підшипникових матеріалів є коефіцієнт тертя і допустимі вантажно-швидкісні характеристики: тиск *p,* що діє на опору, швидкість ковзання *V*. Параметр *p V* визначає питому потужність тертя та гранично допустимі значення навантажень і швидкостей.

Слід зазначити, що показник *pV* істотно відрізняється від експериментальних даних. Він не враховує конструктивних особливостей вузла тертя (масштабного фактора) і типу використовуваних мастил та присадок. У разі легкого режиму роботи значення добутку *pV* можуть бути високими, але для підшипникового матеріалу у важчих умовах роботи вони будуть значно меншими. Тому порівнювати несучу здатність матеріалу за величинами *pV* можна тільки для однотипних режимів роботи.

Наведемо умовну класифікацію несучої здатності матеріалів, розроблену в Інституті проблем матеріалознавства НАН України на основі багаторічного аналізу умов роботи різних антифрикційних матеріалів. Ця класифікація передбачає чотири режими роботи матеріалів – легкий, середній, важкий і гранично важкий. За цією класифікацією несуча здатність матеріалу оцінюється за значенням *pV,* визначеним для даного режиму роботи. Незважаючи на те, що ця класифікація умовна, вона дає змогу розмежовувати рівень властивостей існуючих матеріалів і тих меж параметрів роботи, до яких необхідно прагнути для створення нових матеріалів, а також для стандартизації й уніфікації умов роботи вузлів тертя.

Легкий режим роботи характеризується наявністю мастильного роздільного шару, невеликими значеннями навантажень і швидкостей ковзання, що не викликає підвищення температури в зоні тертя.

Середній режим роботи визначається вищими параметрами навантажень і швидкостей або збільшенням часу експлуатації підшипникового вузла, що супроводжується зменшенням товщини змащення й активнішою участю матеріалу підшипника в процесі тертя.

За важкого режиму тертя навантаження і швидкості високі, кількості змащення в зоні тертя, як правило, недостатньо і працездатність вузлів тертя залежить в основному від походження матеріалів тертьової пари. У цьому випадку температура вузла тертя підвищується.

Гранично важкий режим тертя включає умови роботи вузлів тертя без рідкого мастила, що потрібно для підвищених і високих температур, швидкостей ковзання в різних діапазонах навантажень, у вакуумі, інертних й активних газових і рідких середовищах тощо.

Легкі, середні й важкі умови роботи за наявності рідкого мастила властиві вузлам тертя багатьох машин і механізмів, що застосовуються у сільськогосподарській галузі, транспортному і важкому машинобудуванні. Гранично важкі режими роботи характерні для вузлів тертя металургійного та прокатного устаткування у космічній та авіаційній, атомній, кріогенній, газотурбінній та інших галузях техніки.

11.1.4. Основні зовнішні фактори, що впливають на несучу здатність антифрикційних матеріалів

Під час конструювання підшипників ковзання, в яких використовуються антифрикційні матеріали, необхідно враховувати несучу здатність матеріалу, що залежить насамперед від питомого навантаження і швидкості ковзання. Крім цих факторів, на несучу здатність антифрикційних матеріалів впливають середовище, температура середовища, стан поверхонь тертя, ступінь взаємного перекриття тертьових поверхонь та ін.

Досягнення критичного рівня допустимості дії того або іншого зовнішнього фактора, що впливає на несучу здатність матеріалу, виявляється в різкому підвищенні температури вузла тертя. Відомо, що зовнішньою ознакою сталого процесу є сталість температури в трибосистемі. Отже, одна з основних умов нормальної роботи вузла тертя полягає у рівновазі кількості тертя і тепла, що відводиться в навколишній простір.

11.1.5. Основні види антифрикційних матеріалів

Антифрикційні матеріали на основі олова і свинцю. Сплави на основі олова і свинцю є найдавнішими підшипниковими матеріалами. Ще в 1839 р. англієць М. Бабіт розробив сплав, що містить 82...84% Sn, 5...6% Cu і 11...12% Sb.

Цей сплав поклав початок використанню м’яких білих антифрикційних сплавів у техніці, і тому всі наступні сплави на олов’яній і свинцевій основах почали називати бабітами. Бабіти мають низькі значення твердості (HB 12...32) і температури плавлення (240...320°C), відмінну припрацьовуваність. За антифрикційними властивостями вони перевершують усі інші сплави, але значно поступаються їм щодо опірності втомі. У зв’язку з цим бабіти застосовують лише для тонкого (менше 1 мм) покриття робочої поверхні опори ковзання.

Найпоширенішими бабітами на олов’яній основі є Б93, Б88, Б83, Б83С. Усі вони мають гетерогенну структуру і являють собою механічну суміш твердого розчину на основі олова (м’яка основа) і твердого розчину на основі інтерметалідної сполуки *SnSb* (тверді вкраплення). Висока зносостійкість цих сплавів зумовлена значною міцністю вторинних структур, що утворюються на поверхні сплаву.

Через високий уміст дорогого олова їх використовують для підшипників відповідального призначення (дизелів, парових турбін і т. ін.), що працюють за великих швидкостей і навантажень. Дешевшими є бабіти на основі свинцю. До них належать БКА, БК2, БК2Ш.

Для тонкостінних вкладень бабіт має задовольняти такі вимоги:

- не мати різко вираженої неоднорідної структури;
- підвищену опірність утомному руйнуванню;
- мати знижену твердість;
- міцно з’єднуватися з основою.

Антифрикційні матеріали на основі міді. Як антифрикційні матеріали широко застосовують сплави на основі міді, відомі як бронзи і латуні. Бронзи бувають олов'янисті, алюмінієві.

Склад найуживаніших бронз на олов'янистій основі і бронз, що обробляються тиском, наведено у табл. 11.1, 11.2 відповідно.

Бронзи, що застосовуються в підшипниках ковзання, поділяють на сплави з високим (до 10%) і низьким (до 3%) умістом олова. До складу легувальних домішок входять Sn, Pb, Ni, P, Fe, Sn, Sb та ін.

Для виготовлення втулок, торцевих дисків та інших антифрикційних деталей застосовують олов'янисті бронзи, які деформуються (табл. 11.2).

Крім олов'янистих бронз порівняно широке застосування набули сплави, що не містять олова (безолов'янисті). До них належать БрСуСФ6-12-0,3, БрСуНЦСФЗ-3-20-0,2, БрСуН6-2, БрСуФ6-1, БрКМцЗ-1.

У важконавантажувальних вузлах тертя (дорожніх машин, важкого верстатного устаткування) з успіхом застосовують високоміцні алюмінієві бронзи, а саме: БрА9Мц2, БрА10-Мц2, БрА9Ж4, БрАЮЖЗ-МцІ, 5, БрА10-Ж4-Н4, БрАП-Жб-Нб.

Таблиця 11.1

Склад найуживаніших олов'янистих ливарних бронз

№ з/п	Марка	Sn	Zn	Pb
1	БрОЗ-Ц7-С5-Н1	2,5... 4,0	6,0 ...9,5	3,0...6,0
2	БрОЗ-Ц12-С5	2,0... 3,5	8,0... 15,0	3,0...6,0
3	БрО5-Ц5-С5	4,0... 6,0	4,0... 6,0	4,0...6,0
4	БрО4-Ц4-С17	3,5... 5,0	2,0... 6,0	14,0...20,0
5	БрО3,5-Ц7-С5	3,0... 4,5	6,0... 9,5	3,0...6,0

Таблиця 11.2

Склад бронз, що оброблюються тиском

№ з/п	Марка бронзи	Елементи		
		Sn	P	Ni
1	БрОФ 6,5-0,15	6,0...7,0	0,1... 0,25	—
2	БрОФ 6,5-0,44	6,0...7,0	0,3... 0,4	—
3	БрОФ 7-0,2	7,0...8,0	0,1... 0,25	—
4	БрОФ 8-0,3	7,5...8,5	0,25... 0,3 5	0,1... 0,2
5	БрОФ 6,5-0,4	6,0...7,0	0,3... 0,4	0,1... 0,2
6	БрОЦС4-4-2,5	3,0...5,0	—	—

Як замінники бронз для опор тертя застосовують латуні. Вони бувають подвійні і багатокомпонентні, містять, крім міді та цинку, як основні

елементи алюміній, залізо, марганець, олово, кремній або свинець. Латуні за своїми антифрикційними властивостями значно поступаються бронзам. Двофазні латуні ЛЦ16Д04, ЛЦ38Мц2С2, ЛЦ40МцЗА та інші застосовують за малих швидкостей ковзання (менше 2,0 м/с) і невисоких навантажень, їх часто використовують для опор тертя приладів.

Слід зазначити, що бронзу застосовують також як компонент порошкових антифрикційних матеріалів або тонкостінних пористих покриттів. Найбільшого поширення набули матеріали на сталевій підкладці з напеченим бронзовим шаром, пориста бронза, просочена мастилом, і бронзографітові матеріали. Виробництво виробів з цих матеріалів у світі досягає 10^7... 10^8 штук на день.

Пориста олов'яниста бронза зазвичай містить від 6 до 12% олова. Оптимальні властивості має бронза, що містить 9...11% олова. Пориста бронза заміняє литу бронзу, завдяки чому економиться кольоровий метал.

Пористі бронзи застосовують переважно для виготовлення підшипників ковзання, що працюють у легких умовах, наприклад для приладів, робота яких характеризується малими швидкостями ковзання (менше 1,5 м/с) і невеликими навантаженнями (приблизно 0,5...1 МПа). Такі підшипники не потребують додаткового змащення протягом 3000...5000 год, мають низький і стабільний коефіцієнт тертя (0,01...0,04), низький рівень шуму і надійно працюють у діапазоні температур від –60 до +120°С. В умовах додаткового змащування граничне навантаження для пористої бронзи досягає 8 МПа (якщо V=1 м/с).

Високі антифрикційні характеристики притаманні матеріалам із мідевмісних порошків, здобутих методом порошкової металургії. До них належать бронзографіти, складнолеговані бронзи, мідграфіти.

У зв'язку з тим, що графіт не взаємодіє ні з міддю, ні з оловом, його застосовують як домішку, котра відіграє роль твердого мастила, яке вводять від 1 до 25% залежно від умов роботи матеріалів. Графіт, наявний у бронзі, у процесі тертя поступово утворює графітову плівку на поверхні контртіла. Плівка постійно відновлюється у разі механічних пошкоджень в окремих ділянках поверхні тертя. До цих матеріалів належать БрОГр10-3, БрОГр9-3, БрОГр8-4.

Властивості спечених бронз і бронзографітів можуть бути значно поліпшені легуванням такими елементами, як титан, нікель, свинець, цинк, кобальт, залізо, алюміній та інші, що мають пористість до 12%. Їх границя міцності досягає 3,5 МПа.

Для важконавантажених вузлів тертя застосовують комплексне легування основи і рекомендують замінити традиційні легувальні елементи – олово, свинець і графіт як домішку, такими, як нікель, вольфрам, молібден, ванадій, хром і залізо, що дає змогу зменшити вміст олова до 0,5...0,6%.

Мідграфітові матеріали застосовують переважно для виготовлення нерухомих контактних, радіальних ущільнень і щіток. Їх склад визначають

згідно з потрібними властивостями. У цих матеріалах мідь забезпечує провідність, а графіт підвищує зносостійкість і контактний опір. Уміст графіту коливається від кількох відсотків до 75%. Для поліпшення властивостей щіткових матеріалів додають олово, свинець, цинк. Олово і цинк зміцнюють матеріал, а свинець поліпшує припрацьовуваність і виконує роль мастила. Опір зношуванню спечених мідграфітових матеріалів в умовах роботи щіток набагато вищий порівняно зі звичайними щітковими матеріалами.

Антифрикційні матеріали на основі алюмінію. Використання алюмінієвих сплавів як антифрикційного матеріалу з кожним роком збільшується. Вони мають достатні втомну міцність, корозійну стійкість у мастилах, порівняно високу задиркостійкість і високі антифрикційні властивості.

Сплави на основі алюмінію застосовують як у біметалевому, так і монометалевому виконанні. Останні слугують для виготовлення втулок, підшипників ковзання, шарнірів та ін. Для монометалевих підшипників використовують порівняно тверді міцні сплави, а шар біметалевих вкладишів виготовляють з менш твердого пластичного сплаву.

Алюмінієві сплави завдяки своїм специфічним властивостям застосовують замість антифрикційних сплавів на свинцевій і олов'яній основі, а також свинцевої бронзи. Алюмінієві антифрикційні сплави, що містять до 20% олова, можуть конкурувати з такими дорогими матеріалами, як безолов'яниста бронза.

Алюмінієві сплави класифікують переважно за мікроструктурною ознакою. До першої групи належать сплави АН-2,5, АСМ, а до другої– А09-1, А03-1, А09-2, А09-2Б, А020-1. Останні два сплави мають найкращі властивості.

Підшипники у вигляді литих монометалевих втулок виготовляють зі сплавів з підвищеною конструкційною міцністю: АМКО-1, АМКО-3, АМгК-1, АМгК-2, АММгК-1, АММгК-2 та ін. Хімічний склад деяких алюмінієвих сплавів наведено у табл. 10.3.

Зростає інтерес до антифрикційних сплавів на основі алюмінію, виготовлених методами порошкової металургії, завдяки їх істотним перевагам, таким, як мала питома маса, невисока вартість і велика корозійна стійкість.

Таблиця 11.3

Алюмінієві антифрикційні сплави для монометалевих підшипників ковзання

Умовна марка	Уміст елементів у масі%, решта – алюміній						
	Cu	Mg	Si	Mn	Ti	Sn	Pb
АМКО-1	5,5... 6,5	0,8... 0,9	1,8... 2,0	—	—	3,2... 3,5	—
АМКО-3	2,5... 3,5	1,2... 1,5	3,5... 4,0	—	0,35...0,45	4,0... 5,0	—
АМгК-1	—	7,0... 8,0	1,0... 1,5	1,5... 2,0	0,15... 0,4	4,0... 5,5	—
АМгК-2	—	7,0... 8,0	1,0... 1,5	1,5... 2,0	0,15... 0,4	—	4,0...5,5
АММгК-1	2,0... 2,5	4,0... 4,5	1,2... 1,6	0,8... 1,2	0,3...0,5	5,0... 5,5	—
АММгК-2	2,0... 2,5	4,0... 4,5	1,2... 1,6	0,8... 1,2	0,3...0,5	—	4,0...4,5

Підшипникові матеріали на основі алюмінію зазвичай леговані різними елементами і містять 10...60% пор. Ці матеріали просочують мастилом. Матеріали на основі алюмінію, що містять мідь або магній, а також обидва елементи, рекомендовано для виготовлення підшипників, що працюють за низьких питомих навантажень у вузлах тертя, профілактичний ремонт яких не бажаний, наприклад у приладах, сільськогосподарських машинах, конторських апаратах.

Високі значення жароміцності, зносостійкості і теплопровідності мають матеріали на основі алюмінію, що містять 5...10% одного або кількох елементів із групи заліза, а саме: нікель, хром і 0,5...5% кремнію.

Для виготовлення деталей вузлів тертя двигунів внутрішнього згорання і вузлів тертя, що працюють без мастила, застосовують матеріали, до складу яких входять графіт, сульфіди, оксиди, карбіди.

Підшипникові матеріали на основі алюмінію, що працюють за підвищених температур, у своєму складі містять порошки твердих сплавів, таких, як WC, TiC, а в деяких випадках – нітрид бору.

Антифрикційні матеріали на основі цинку відомі давно, однак вони не набули поширення, не зважаючи на ряд значущих властивостей, що дають змогу замінити цими сплавами бабіти і деякі антифрикційні бронзи.

Перевагами сплавів на основі цинку варто вважати високу припрацьовуваність і технологічність.

Відмітною особливістю цинкових сплавів від бронз і алюмінієвих сплавів є підвищення міцності і пластичності після гарячої обробки тиском (250...300°С).

Основними антифрикційними матеріалами з цинковою основою, що застосовуються для виготовлення підшипників ковзання замість бронз і бабітів, є ЦАМ4-1, ІДАМ5-1, ЦАМ9-1Д ЦАМ10-5, ЦОСЗ-3 та ін. Їх застосовують переважно у вузлах тертя залізничного транспорту. Склад найуживаніших сплавів наведено у табл. 11.4. Підшипники ковзання й інші деталі з цинкових сплавів вживаються в литому й обробленому тиском (прокатка, пресування) станах.

Склади закордонних цинкових сплавів **Таблиця 11.4**

№з/п	Марка (країна)	Хімічний склад,%			
		Al	Cu	Mg	Mn
1	1010(Німеччина)	9...11	0,6... 1,0	0,02...0,05	—
2	410 (Німеччина)	3,7...4,3	0,6... 1,0	0,02...0,05	—
3	(Японія)	10	2	—	0,2
4	Алцен 305 (Австрія)	30	5	—	—

Антифрикційні матеріали на основі заліза. На основі заліза застосовують як антифрикційні матеріали два сплави: сталь і чавун. Однак унаслідок високої твердості і температури плавлення, незадовільної припрацьовуваності і схоплюваності зі сполучуваною поверхнею сталі як антифрикційні матеріали застосовують рідко. Зазвичай використовують мідисті сталі, що мають малий уміст вуглецю, або графітизовані сталі, що мають вкраплення вільного графіту.

Чавуни застосовують для підшипників та інших деталей вузлів тертя в більшій кількості й асортименті, ніж сталі. Антифрикційність чавунів забезпечується наявністю в структурі вільного графіту. Він може бути у вигляді глобул і пластин. Крім графіту, в структурі антифрикційного чавуну має бути вільний ферит (не більше 15%) і не повинно бути вільного цементиту.

Антифрикційні чавуни містять 2,8...3,8% C, 1,5...2,7% Si, 0,4...1,2% Mn, а також залежно від марки чавунів у їхній структурі можуть міститися такі елементи: Ni, Cr, Cu, P і S. Найпоширенішими антифрикційними чавунами є: А4С-1, А4С-2, А4С-3, ковкий А4-1, високоміцний А4В-1. Задля зменшення зношуваності сполученої деталі марку чавуну вибирають так, аби його твердість була нижчою від твердості сталевої цапфи. Перевага чавунів – невисока вартість.

Найпоширенішими антифрикційними матеріалами на основі заліза є спечені матеріали. Вони успішно конкурують з литими сплавами типу бабітів і бронз і зі спеченими бронзами завдяки недефіцитності вихідної сировини і можливості широкого впливу на їхні антифрикційні властивості легуванням і введенням різних присадок.

На основі заліза застосовують різноманітні спечені антифрикційні матеріали

– пористе залізо, просочене мастилом, залізо–графіт, залізо–мідь–графіт, сульфідовані залізографітові матеріали, матеріали з присадками як твердим мастилом фторидів кальцію або барію, пористі матеріали, просочені свинцем або легкоплавкими сплавами на основі міді, олова, свинцю та інших присадок, сульфідовані неіржавійні сталі, складнолеговані пористі матеріали та ін.

Уведення в сплави заліза легувальних домішок підвищує фізико-механічні властивості й забезпечує працездатність матеріалів в умовах абразивного зношування, підвищених навантажень, швидкостей ковзання і температур за наявності агресивних газів і рідин, значно розширюючи можливі межі працездатності спечених антифрикційних матеріалів і сфери їх застосування.

Пористе залізо. Це найпростіший тип матеріалів, що мають феритну пористу структуру.

Пористе залізо у разі рясної подачі мастила зберігає свою працездатність за навантажень 2,0...2,5 МПа і швидкості ковзання 1...2 м/с. Дослідження пористого заліза в більш важких режимах тертя обмежується робочою температурою, що не повинна перевищувати 70...80°С, оскільки при цьому інтенсивно розвиваються процеси пластичного деформування, розчинення мастила і втрати ефекту самозмащування. Ці матеріали можуть короткочасно працювати при навантаженнях на підшипник до 7...10 МПа та швидкості ковзання до 5 м/с.

Пористе залізо використовують у галузях промисловості для виготовлення самозмащувальних підшипників ковзання, побутової апаратури, приладів, лічильних пристроїв, прядильних кілець та ін.

Залізографіт – найпоширеніший матеріал на основі заліза. Залізографітові матеріали мають перлітно-феритову структуру. Найбільша зносостійкість притаманна матеріалам, що мають перлітну структуру. Зміст феритної складової допускається до 50% і залежить від режиму роботи підшипників. Основними матеріалами є ЖГр3, ЖГр4.

Найстабільніші фізико-механічні, технологічні властивості та структуру має залізографітовий матеріал, що містить 0,8... 1% графіту. Гранична швидкість ковзання для цих матеріалів становить 2...3 м/с, а тривалість роботи визначається умовами їх роботи і не перевищує 3...5 тис. год.

Композиції залізо–мідь і залізо–мідь–графіт широко застосовують у промисловості. Уведення міді в порошковий матеріал на основі заліза сприяє підвищенню його міцності, сприятливо впливає на його змащуваність і дає змогу регулювати зміну розмірів у разі усадки в процесі спікання.

Кількість міді, що вводиться в антифрикційний матеріал на залізній основі, коливається в межах 2,5...20%.

У більшості цих матеріалів міді утримується до 5...9%. Їхні властивості мало відрізняються від пористого заліза і залізографіту. Вони застосовуються лише при роботі зі змащенням і рідше в режимі самозмащування. Ці матеріали марок ЖД3, ЖД5. Значно поліпшити властивості антифрикційних матеріалів залізографіту можна введенням їх до складу міді, що запобігає утворенню цементиту, поліпшує структуру і механічні властивості матеріалу, підвищує мікротвердість. Основними марками цих матеріалів є ЖГр1Д3, ЖГр1Д5, ЖГр1, 5Д5, ЖГр4Д7.

Високі триботехнічні характеристики матеріалів композицій залізо—

мідь і залізо–мідь–графіт дають змогу застосовувати їх у відповідальних вузлах тертя, де потрібна підвищена міцність підшипникового матеріалу. Такі матеріали здатні витримувати статичні навантаження 60...290 МПа.

Матеріали залізо–мідь–графіт–фосфор. Легування залізо–мідь–графітових антифрикційних матеріалів фосфором дає змогу значно підвищити їх опір пластичній деформації в умовах тертя. Ці матеріали мають вищу зносостійкість унаслідок тертя без мастила. Оптимальними визнано матеріали на основі заліза, що містять 1,2% графіту і 0,2...0,4% фосфору, за вмісту графіту 0,6 фосфору рекомендується 0,9%.

Матеріали, що містять сірку, сульфіди і селеніди. Сірка позитивно впливає на фізико-механічні властивості та структуру залізографіту й істотно поліпшує експлуатаційні характеристики матеріалів.

Сірка вводиться в антифрикційні матеріали на основі заліза як легувальний елемент і у вигляді сульфідів різних матеріалів. Найвищі гранично допустимі навантаження (5... 10 МПа) мають матеріали з перлітною і феритно-перлітною структурами, що містять 4...8% 2п і 1...3% графіту з поруватістю в межах
15...25%.

Антифрикційний матеріал марки ЖГр3ЦС4, що містить 3% графіту і 4% Zn, під час випробовувань у різних умовах тертя показав переваги перед іншими залізографітовими матеріалами і бронзами.

Матеріали залізо–графіт–молібден. Для деяких композиційних матеріалів, що містять молібден, характерне зменшення коефіцієнта тертя зі збільшенням швидкості ковзання і питомого навантаження. При цьому за цією характеристикою і за зносостійкістю він перевершує олов'янисту бронзу (табл. 10.5).

Таблиця 11.5

Порівняльні випробовування матеріалу ЖГр3М15 і бронзи БрОФ в умовах тертя без змащування по сталі 45 (HRC = 43...47)

V, м/с	P, кг/см^2	БрОФ		ЖГр3М5	
		μ	I, мкм/км	M	I, мкм/км
2	2	0,38	20	0,56	10
4	2	0,30	40	0,43	69
6	2	0,43	160	0,42	50
8	2	0,38	322	0,42	65

Матеріали на залізній основі, що містять фториди і хлориди

Антифрикційні матеріали на основі заліза, що містять як тверде мастило фториди металів, працездатні у разі підвищених навантажень і температур без змащення й у вакуумі. Робоча температура цих матеріалів може досягати 650°С. Склад і властивості деяких матеріалів, що містять фториди,

придатних для роботи за підвищених температур у повітряному середовищі і вакуумі, наведено у табл. 11.6.

Таблиця 11.6

Типові склади антифрикційних матеріалів на основі заліза, що містять фториди металів

Склад матеріалу,%	Пористість,%	Твердість HB, кг/мм 2	Міцність при стисканні, кг/мм^2	Ударна в'язкість, кг*м/см
94Fe - 6CaF_2	9,0...10,0	Близько 56	87	0,35
91Fe - 9CaF_2	4Д…6...6,0	Близько 62	90	0,19
79Fe - 15Mo - 6CaF_2	2,0...3...3,0	Близько 185	110	0,30
94 Fe - 5CaF_2 - 1C	12,0...14,0	70...80	—	—
88Fe - 6Ni - 5CaF_2 - 1C	10,0...12,0	100...110	—	—

Матеріали на залізній основі, що містять свинець або сплави на основі кольорових металів. Підвищити міцність й антифрикційні властивості матеріалів на основі заліза можна також додаванням до них свинцю або сплавів на основі кольорових металів. Це здійснюється у двох напрямах:

1) додавання кольорових металів у шихту;

2) просочування спечених пористих матеріалів на основі заліза розплавленими кольоровими металами.

Для підшипників, що працюють за питомих навантажень, більших за 1 МПа, пропонується матеріал, що складається з 60...90% заліза та 40–10% сплаву, що містить 85% Cu, 5% Sb, 5% Pb, 5% Zn. Цей сплав у вигляді порошку додається до порошку заліза під час шихтування.

Композиційний матеріал на основі заліза, що містить 15...30% свинцю і 3...5% міді, просочується мастилом. Матеріали, у складі яких 0,8 C, 2,5% Si, 3...5% Cr, 6... 10% Mo, до 2% Ni, решта – залізо, просочуються сплавом 90% Cu + 10% Sn. Вони здатні працювати за великих питомих навантажень.

Антифрикційні матеріали на основі нікелю і кобальту. Відомо, що нікель і кобальт мають низькі триботехнічні характеристики й особливо нікель, оскільки він пластичний і в умовах тертя без змащення схоплюється. Однак спечені композиційні порошкові матеріали на основі нікелю і кобальту за наявності мастильного матеріалу мають високі триботехнічні характеристики, особливо в агресивних середовищах.

Антифрикційні матеріали являють собою багатокомпонентну композицію, до складу якої входять, крім нікелю, такі елементи, як залізо, мідь, а як зміцнювальні частинки використовують берилій, бор, молібден, тугоплавкі сполуки типу *Si*, B_4C, *WC, Ti*, Zn_2, Mo_2 та ін.

Для підвищення антифрикційних властивостей у ці матеріали вводять

графіт, фториди кальцію, барію або стронцію. Зношеність композиційних нікелевих матеріалів, просочених фторидами кальцію або барію, або матеріалів, просочених їх евтектиками, в умовах тертя без змащення становить 10 мкм/км, а коефіцієнт тертя – 0,15...0,25.

Залізонікелеві композиційні матеріали, що містять 50% нікелю і більше, мають достатню корозійну стійкість у морській воді, лугах і деяких розчинах кислот. Вони міцніші і менш пластичні, ніж мідно-нікелеві сплави, можуть витримувати великі навантаження.

Антифрикційні матеріали на основі кобальту мають одну відмітну властивість, сутність якої полягає в зменшенні коефіцієнта тертя з підвищенням температури. За кімнатної температури його коефіцієнт тертя становить 0,32; за 260°С – 0,25; а за 538°С – усього 0,16. Однак за температури 540°С кобальт можна застосовувати як антифрикційний матеріал лише в закритих системах або інертних середовищах. Для підвищення працездатності матеріалів на основі кобальту за високих температур до їх складу додають різні тверді мастила в межах 5...20%.

Антифрикційні матеріали на основі тугоплавких металів і сполук. Характерними властивостями металів і сплавів на основі металів IV—VI груп періодичної системи елементів та їхніх сполук з вуглецем, бором, азотом, кремнієм і киснем є висока твердість і міцність. Ці властивості особливо важливі для фукнкціонування вузлів тертя в умовах високих температур, швидкостей ковзання, що супроводжуються розігрівом і абразивною дією середовища.

У більшості випадків основою в цих матеріалах є сполуки типу WC, W_2C, Mo, Mo_2C, Ti, Cr_3C, Cr_7C_3, Ta, Ti_2, CrB_x або композиція WC-Ti, WC-TiC-Ta, TiC- Ti_2 та ін. Просочення їх феросплавами, що містять бор і кремній, підвищує їх щільність і міцність. Багатофазні композиційні матеріали на основі нітриду кремнію пористістю 20...34% просочують розкиснювальними сплавами, що взаємодіють з Si_3K_4, задля підвищення міцності. Ці матеріали здатні працювати як за кімнатних, так і за високих температур.

Для підшипників ковзання, що працюють в особливих умовах, рекомендовані матеріали композиції *Ц—BN*. Їх зносостійкість визначається вмістом *BN*, зі збільшенням якого від 10...20% коефіцієнт тертя вольфраму не знижується, але зменшується його зношуваність у діапазоні швидкостей ковзання до 5,5 м/с за малих навантажень.

Через невисоку стійкість проти окиснення матеріали на основі карбідів, нітридів, боридів і багатьох інтерметалідів можуть бути використані лише до температури 540°С на повітрі.

Антифрикційні властивості матеріалів на основі тугоплавких металів і їхніх сполук визначаються умовами експлуатації й значною мірою залежать від матеріалів сполучених з ними деталей.

Антифрикційні матеріали на основі пластмас. Як антифрикційні матеріали набули поширення пластмаси, синтезовані на основі однотипних і модифікованих смол і їхніх композицій з різними наповнювачами,

стабілізаторами, пом'якшувачами, прискорювачами й іншими домішками. Як наповнювачі для антифрикційних пластмас застосовують матеріали органічного походження (деревне борошно і кришиво, дерев'яний шпон, бавовняні тканини та ін.), наповнювачі неорганічного походження (графіт, тальк, дисульфід молібдену, азбест, скляні нитки, каолін та ін.). Наповнювачі можуть бути листовими, сітчастими, волокнистими, порошковими і газовими.

До антифрикційних матеріалів на основі пластмас, що застосовуються у вузлах тертя, варто віднести поліетилен низького і високого тиску, фторопласт, полістирол, вініпласт, капролон, капрон технічний, поліформальдегід, плексиглас та ін.

Основними перевагами антифрикційних матеріалів на основі пластмас порівняно з металевими є зносостійкість, високе відношення міцності до питомої маси, здатність до гасіння вібрацій, високий опір схоплюванню з матеріалом вала, технологічність процесів виготовлення й обробки, низька вартість. Недоліки – низька теплопровідність, гігроскопічність, високий коефіцієнт лінійного розширення, низька механічна міцність.

Працездатність і несучу здатність полімерів можна значно підвищити за допомогою наповнювачів і армування.

У сучасних вузлах тертя знаходять застосування три типи метало-полімерних матеріалів: зміцнених сталевою підкладкою; поруватих спечених виробів, просочених фторопластом; наповнених фторопластом, не армованих каркасом.

Основні вимоги до антифрикційних матеріалів на основі пластмас такі: надійність, довговічність, мінімальна маса, металомісткість і собівартість. Вхідні складові компоненти мають бути доступні й технологічні.

Визначальний вплив на антифрикційність матеріалів на основі полімерів має тип сполучного, яким можуть бути як термопластичні (поліолефіни, поліаміди, полікарбонат, фторопласт та ін.), так і термореактивні полімери (фенолформальдегідні, епоксидні та інші смоли). Деякі властивості матеріалів з цими сполучними наведено в табл. 11.7.

Таблиця 11.7

Властивості матеріалів

Тип сполучення	Границя міцності, МПа		Гранична робоча температура,° С	Потужність тертя *(PV)*, МПа*м/с	Коефіцієнт тертя μ
	У разі стискання	У разі розтягування			
Термопластичні полімери	—	70...80	373...93	0,02...0,1	0,15...0,40

Термореактивні полімери	80... 100	—	523...73	0,2...0,5	0,1...0,40

Антифрикційні матеріали на основі термопластів характеризуються високими триботехнічними характеристиками, низькою вартістю, високою технологічністю, однак унаслідок схильності до схоплювання за підвищених температур їх застосовують рідко.

Триботехнічні характеристики політетрафторетилену й інших сполучних наведено в табл. 11.8. Випробовування здійснювалися в парі зі сталлю без мастила.

Ці матеріали застосовуються у вузлах тертя машин і механізмів, що працюють без змащення, а також зі змащенням водою або технологічними рідинами, в умовах вібрацій і питомих навантажень.

Антифрикційні матеріали на основі поліетилену (ПЕНТ), надвисокомолекулярного поліетилену (НВМПЕ) і мінеральних дисперсних наповнювачів (туфу, тепу, кальциту, каоліну) – компонори за своїми властивостями не поступаються кращим зносостійким матеріалам на основі фторопласту-4.

Таблиця 11.8

Триботехнічні характеристики композиційних матеріалів на основі термопластичних полімерів

Матеріал	Коефіцієнт тертя		Відносне зношування
	Статичний	Кінетичний	
Поліаміди	0,2...0,25	0,25...0,30	200
Поліфармальдегід	0,15	0,20	65
Політетрафторетилен	0,10	0,15	8
Полікарбонат	0,30	0,40	2500
Поліуретан	0,30	0,40	3400

Для роботи в прісній або морській воді рекомендується матеріал типу «масляниту». Коефіцієнт тертя в парі зі сталлю становить 0,05. Цей матеріал має високу працездатність не тільки у воді, айв агресивних середовищах і глибокому вакуумі. Характерною ознакою маслянитів є наявність граничних мастильних шарів, що являють собою металеві мила в будь-якому мікроперетині, генеровані на поверхні тертя.

Перспективним є використання як основи поліаміду – фенілону. Його працездатність зберігається до 260°С. Матеріали на основі фенілону застосовуються у вузлах тертя з питомими навантаженнями до 50 МПа. Для зниження коефіцієнта тертя до значень 0,07...0...0,10 до цих матеріалів додають тверді мастила (MoS_2, *ВІЧ*, графіт).

Одним із найпоширеніших і застосовуваних матеріалів у вузлах тертя є

неполярний полімер – фторопласт. Це фторопохідний етилен, у якому атоми водню частково або цілком заміщені фтором. Промисловість випускає такі марки фторопластів: 4, 4Д, 40, 42, 3, 3М, 30, 32Л, 2, 10 і т.д. Як сполучний переважно використовують фторопласт-4 (політетрафторетилен).

Для підвищення зносостійкості і механічної міцності в композиції на основі фторопласту вводять йодиди металів, бронзи, хлористий натрій, скловолокно. Для матеріалів, що працюють в агресивних середовищах, наповнювачами є карбіди титану, хрому, вольфраму і кремнію.

Як антифрикційні матеріали на основі фторопласту широко відомі матеріали ОР, ОП, ОО, розроблені фірмою «Гласир». Наповнювачем у цій композиції слугує графіт і металевий порошок (будь-який сплав міді). Для збільшення міцності можна вводити скловолокно, волокна заліза, вуглецеві й азбестові волокна. Матеріал ОР складається зі сталевої стрічкової основи, тонкого шару (0,3...0,4 мм) пористої бронзи, пори якої заповнені фторопластом, товщина фторопластового шару – 0,01...0,03 мм. Матеріал ОР є аналогом металофторопластової стрічки вітчизняного виробництва.

У вузлах тертя застосовують деталі, виготовлені з антифрикційного матеріалу на основі поліформальдегіду. Він належить до найтвердіших полімерів.

Уведення в поліформальдегід скловолокна, графіту, сажі, дисульфіду молібдену, політетрафторетилену підвищує його термостійкість. У результаті поліпшується тепловий режим роботи підшипників, зубчастих коліс, муфт зчеплення, шестерень, клапанів, при цьому знижується зношуваність (у три-чотири рази), збільшується працездатність пари тертя, зменшується (у 1,5...2 рази) коефіцієнт тертя.

Для виготовлення деталей, що працюють в умовах тертя і зношування, застосовують антифрикційний матеріал на основі полікарбонату. Це складний поліефір вугільної кислоти; випускається під назвою дифлон.

Антифрикційний матеріал на основі полікарбонату ДАК містить 15...20% фторопластів. Він зберіг основні властивості дифлону. При цьому його коефіцієнт тертя по сталі становить 0,15...0,20, а зносостійкість у 30 разів вища. З полікарбонатів виготовляють шестерні, підшипники й інші деталі вузлів тертя. Високі антифрикційні властивості мають матеріали на основі поліарилатів – складних гетерогенних поліефірів. Вони характеризуються високою термічною стійкістю і морозостійкістю (до –100°С), а також механічною міцністю і зносостійкістю.

На основі поліарилатів створено антифрикційні матеріали типу АМАН, що мають низький коефіцієнт тертя і високу зносостійкість. Їх працездатністьзберігається до температури 300°С. Висока зносостійкість трибосистеми поліарилат—сталь пояснюється утворенням на сталевій поверхні тонкої мастильної плівки, що виникає в результаті фрикційного перенесення.

Матеріали на основі поліарилатів застосовують для виготовлення підшипників ковзання, що працюють у глибокому вакуумі без змащення, як ущільнювальні матеріали в буровій техніці.

Антифрикційні матеріали на основі термореактивних полімерів. Термореактивні пластмаси (реактопласти) отримують на основі епоксидних, поліефірних, поліуретанових, фенолоформальдегідних і кремнієорганічних полімерів. Задля поліпшення міцнісних і триботехнічних характеристик у фенолоформальдегідні смоли вводять волокнисті й порошкові наповнювачі.

Коефіцієнти тертя по сталі термореактивних матеріалів залежно від типу наповнювача наведено в табл. 11.9.

Таблиця 11.9

Значення коефіцієнта тертя термореактивних матеріалів

Матеріал	Наповнювач	Коефіцієнт тертя без змащення по сталі
Волокніт	Бавовняне волокно	0,33
Азбоволокніт	Азбестове волокно	—
Скловолокніт	Скляне волокно	0,34
Текстоліт	Бавовняна тканина	0,30
Азботекстоліт	Азбестова тканина	0,34...0...0,38
Фенопласт	Органічний або мінеральний (графіт, капрон, фторопласт та ін.)	0,20

Волокніти – це пластмаси, у яких наповнювачем є волокна. Вони характеризуються підвищеною міцністю, а головне – ударною в’язкістю. Завдяки волокнам ударна в’язкість перевищує 10 кДж/м^2.

Азбоволокніти – це пластмаси, у яких наповнювачем є азбестові волокна. Вони мають високу теплостійкість (до 200°С).

Скловолокніти – це пластмаси, в яких наповнювачем є скляні волокна. У разі використання скляного волокна ударна в’язкість досягає 20...30 кДж/м^2.

Антифрикційний матеріал на основі фенолоформальдегідної смоли, модифікованої оксидами магнію і цинку, містить, крім графіту й азбестового волокна, напритовий каучук (14...24%). Домішка наприту дала змогу підвищити стійкість композиції до дії кислот і лугів, зносостійкість і механічну міцність при роботі в агресивних середовищах і в умовах абразивного зношування. Для поліпшення самозмащування в умовах тертя без змащення або граничного тертя використовують композиції на основі фенольної смоли, просочені мінеральним мастилом. У деяких випадках, окрім основних компонентів, у композицію додають пластичне мастило, що в результаті витискування крізь капіляри потрапляє в зону тертя.

Домішка високодисперсного графіту й ацетиленової сажі, масова частка яких становить 10%, сприяє зниженню коефіцієнта тертя композиції на основі аніліноформальдегідної смоли СФ-342А до 0,12...0,14.

У ряді самозмащувальних антифрикційних матеріалів як сполучного ефективно використовуються сполуки фурану. Матеріал «антегфур» на основі олігомеру ФА має високу тепло- і термостійкість (150...200°С) і зберігає достатню працездатність в умовах тертя без змащування, а також у розчинах мінеральних і органічних кислот.

Для роботи у вузлах тертя фрикційних демпферів, підшипників ковзання, що ковзають по напрямних у парі зі сталлю й алюмінієвими сплавами, розроблені матеріали на основі модифікованого фенолоформальдегідного олігомеру, наповненого термопластичними полімерами (поліетилен ПЕНД, фторопласт 32Л, фторопласт 42Л).

Матеріали на основі поліамідного олігомеру розроблені для умов, що потребують низького тертя. Як наповнювач використовують графіт або низькомолекулярний ПТФЕ. Однією з переваг цього матеріалу є його висока технологічність.

Високу працездатність у глибокому вакуумі (коефіцієнт тертя 0,015...0,020), границю міцності під час стискання (200 МПа) і допустиму температуру (500°С) мають антифрикційні матеріали на поліамідній основі.

Епоксидні полімери в чистому вигляді для виготовлення деталей тертя не застосовуються. Високі антифрикційні властивості для роботи в агресивних середовищах мають високонаповнені епоксидні смоли з графітом і дисульфідом молібдену. Ці композити мають коефіцієнт тертя без мастила 0,15...0,25, з мастилом – 0,05.

На основі епоксидної смоли холодного твердіння ЕД-6 розроблено матеріал антифрикційного призначення, що включає як компоненти алюмінієву пудру і мінеральне мастило МК-8. Коефіцієнт тертя становить 0,3...0,35.

Жорсткість режимів експлуатації вузлів тертя машин і механізмів потребує нових підходів до створення антифрикційних матеріалів на полімерній основі. Правильний підбір армувальних наповнювачів дасть змогу розширити межі застосовності композиційних матеріалів на основі термопластичних і термореактивних полімерів.

Антифрикційні вуглецеві матеріали поділяють на вуглецеві – випалені та графітовані (без просочення і просочені металами та сплавами), графітофторо-пластові та графітопластові. Для їх виготовлення використовують не випалений нафтовий кокс і кам’яновугільний пек з додаванням природного графіту.

Максимальна температура обробки випалених матеріалів становить 1300°С, а графітованих – 2300...2600°С. Просочення виконують бабітом, бронзою, сплавами свинцю й олова та іншими, а для здобуття графітопластових антифрикційних матеріалів використовують високополімерні сполуки.

Антифрикційні вуглецеві випалені матеріали мають підвищену твердість і міцність, але меншу теплопровідність, ніж графітовані. Їх коефіцієнт термічного розширення нижчий, ніж металів, а коефіцієнт тертя –

в межах 0,05-0,1.

З підвищенням температури міцність на розтягування антифрикційних графітових матеріалів значно підвищується (за температури 2500°С майже вдвічі вища, ніж за 20°С), а коефіцієнт тертя знижується в три рази. Після просочення металом (сплавом) вуглецеві матеріали стають непроникними для рідин і газів за високих тисків, а також підвищується їх міцність, а в окремих випадках підвищується працездатність в умовах тертя.

Графітофторопластові антифрикційні матеріали пружнопластичні, й хоча вони мають меншу міцність порівняно з вуглецевими, але є щільнішими і непроникними для рідин та газів.

Вуглецеві антифрикційні матеріали (табл.11.10) хімічно стійкі у багатьох агресивних газових і рідинних середовищах. Вони стійки майже в усіх кислотах (до температури кипіння кислоти), у розчинах солей, в усіх органічних розчинниках, і обмежено стійкі в концентрованому середовищі їдкого лугу.

Величина зношуваності за гранично допустимих питомих навантажень і швидкостей в умовах тертя на повітрі за кімнатної температури за 100 год становить, мкм:

— вуглецеві (випалені і графітовані) матеріали – 50;

— ті самі матеріали, просочені металами – 30;

— графітофторопластові – 30.

Під час експлуатації антифрикційних матеріалів (табл. 10.10) рекомендується застосовувати більш низький питомий тиск, ніж гранично допустимий, і за таких умов величина зношування значно знижується.

Працездатність вуглецевих антифрикційних матеріалів значною мірою залежить від складу і вологості газового середовища. За наявності на поверхні тертя плівок або крапель конденсованої вологи зношування і коефіцієнт тертя вуглецевих антифрикційних матеріалів зростає приблизно в десять разів, а коефіцієнт тертя матеріалів, просочених металами, – у два рази.

11.2. Фрикційні матеріали

11.2.1. Класифікація і вимоги до фрикційних матеріалів

Фрикційні матеріали застосовують у фрикційних динамічних пристроях, до яких належать гальма, накладки, спеціальні опори ковзання, муфти, варіатори. Ці пристрої призначені для розгону (муфти зчеплення) і зупинки (гальма, лижні й ковзні опори ковзання) транспортних машин, у приводах технологічного устаткування (різні фрикційні муфти і регулятори) для передавання і зміни напрямку руху.

Фрикційні матеріали працюють у важких умовах зношування за високих питомих навантажень (до 8 МПа), швидкостей ковзання (до 50 м/с) і температур, що можуть миттєво підвищуватися до 1200°С.

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. У зв'язку з цим до фрикційних матеріалів ставлять вимоги, основні з яких такі:

1. Висока фрикційна теплостійкість, тобто здатність пари тертя зберігати стійке значення коефіцієнта тертя і мати мале зношування у широкому діапазоні температур.

2. Достатня величина і стабільність коефіцієнта тертя. Під час роботи фрикційної пари коефіцієнт тертя має бути в межах 0,2...0,5, процес тертя має бути досить стабільним.

3. Припрацьовуваність. Елементи фрикційної пари мають припрацьовуватися досить швидко так, щоб з першим гальмуванням гальмівний момент становив не менше 80% і не більше 120% від розрахункової величини. При цьому на поверхні тертя не повинні утворюватися задири.

4. Несхоплюваність. Пари тертя не повинні схоплюватися (зварюватися) як у процесі гальмування, так і в інших випадках, наприклад після гальмування, коли гаряче гальмо залишається загальмованим.

5. Висока корозійна стійкість. У разі тривалого перебування у вологій атмосфері (до 100%) і за температури від мінус 60 до +150°С елементи фрикційної пари не повинні піддаватися корозії.

6. Вогнебезпечність. У процесі гальмування і наприкінці роботи гальмівного пристрою фрикційні матеріали і продукти їх зношування не мають загоратися, а також не повинно бути неприємних запахів і диму.

7. Достатня механічна міцність. У разі багаторазового гальмування фрикційні матеріали повинні володіти достатньою механічною міцністю, добре протистояти тепловому удару, що виникає за інтенсивного гальмування.

8. Зносостійкість. Гальмівна пара повинна бути достатньо стійка до стирання. Зазвичай заміна гальмівних колодок пов'язана зі значними труднощами. Крім того, у процесі зношування збільшуються зазори. У зв'язку з цим необхідно, щоб матеріал забезпечував досить тривалу роботу.

9. Теплопровідність і теплоємність.

10. Технологічність.

11. Економічність. Часто до фрикційних матеріалів ставлять додаткові вимоги, пов'язані з мастило-, водостійкістю, безшумністю в роботі, стійкістю в арктичних і тропічних умовах, опором до термічної втомленості, утворенням тріщин та ін.

І.В. Крагельський запропонував усі фрикційні матеріали поділити на такі групи:

1) матеріали для легких умов тертя (короткочасна температура до 400°С,

тривала – до 120°С, тиск – 8 МПа);

2) матеріали для середніх умов тертя (короткочасна температура до 400°С, тривала – до 250°С, тиск – до 1,5 МПа);

3) матеріали для важких умов тертя (короткочасна температура до 1100°С, тривала – до 400°С, тиск – до 6 МПа).

11.2.2. Основні види фрикційних матеріалів

Фрикційні матеріали на основі азбесту. Азбестові матеріали розрізняються сполучним і наповнювачем. Крім азбесту, як наповнювач застосовують метали у вигляді стружки, дроту або порошку (латунь, мідь, алюміній, свинець), графіти, оксиди і солі металів (каолін, оксид цинку, сурик). Залежно від типу зв'язувального азбофрикційні матеріали поділяють на чотири групи:

1. Матеріали на мастильному і бітумно-мастильному сполучному.

Мастильне сполучне забезпечує високу еластичність матеріалу, однак не дає змоги домогтися високої міцності. Максимальна робоча температура не перевищує 200°С.

2. Матеріали на каучуковому сполучному – азбокаучуки (6 КХ 1; 6 КФ-32; 6 КВ-10; 6 КХ-15 і ін.). Міцність і пружність цих матеріалів залежать від умісту в них сірки. Робоча температура азбокаучуку не перевищує 250°С.

3. Матеріали на основі термореактивних смол – азбосмоляні (КФ-ЗМ, К15-6, К15-ВМ, ФК-16Л, ФК-24А).

4. Комбіновані матеріали, що містять як сполучне каучук і смолу (7КФ-31). Залежно від способу виготовлення азбофрикційні матеріали можуть бути ткані, формовані, пресовані і вальцьовані.

До азбестовмісних фрикційних матеріалів, як наповнювач, крім азбесту, додають метали (*Cu, Al, Pb*, сплави на основі міді (латунь)) у вигляді стружки або дроту для підвищення теплопровідності, графіти; оксиди або солі металів (оксид цинку, барит та ін.) для збільшення коефіцієнта тертя.

Азбокаучукові матеріали застосовують як гальмівні накладки в гальмах автомобілів, кільцях зчеплення тракторів, автомобілів й інших машин. Недоліком цих матеріалів є різке зменшення коефіцієнта від температури та їх теплоємності.

З азбосмоляних матеріалів найкращим є ретинакс. Він витримує температуру до 1000°С, має досить стійкий коефіцієнт тертя. Ретинакси ФК-24
А 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 гальмівних пристроях літаків, автомобілів та інших машин.

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.

Порошкові металокерамічні фрикційні матеріали. Порошкові металокерамічні фрикційні матеріали застосовують у важких режимах тертя. Їх роблять на залізній і мідній основах. Найпоширенішими фрикційними матеріалами на основі заліза є ФМК-8 і ФМК-11, МКВ-50А і СМК, а на основі міді – МК-5.

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.

Спечені порошкові матеріали застосовують для оснащення таких вузлів, що працюють у вузлах тертя без мастила, як дискові гальма, муфти зчеплення автомобілів, фрикційні вузли різних приладів, рідше – для колодкових і стрічкових гальм деяких передавальних пристроїв.

Матеріали на основі міді й мідних сплавів. Фрикційні порошкові матеріали на основі міді застосовують для роботи в умовах тертя без мастила і з мастилом.

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

Матеріали на основі олов'янистої бронзи містять 62...86% міді, 5...10% *Sn*, 5...10% *Pb*, до 2% *Fe*, 4...8% *C* (графіту), до 3% Si_2, до 2% *Ni*, 0,75% *Si*. Їх застосовують у гальмівних пристроях, що працюють без мастила.

Для роботи гальмівних пристроїв в умовах тертя без змащування великого поширення набув матеріал марки МК-5 на основі олов'янистої бронзи з максимальною робочою температурою 300...350°С і коефіцієнтом тертя 0,16...0,32. 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 продовжити термін експлуатації фрикційної пари у 15 разів.

Матеріали для роботи в умовах рідкого мастила. Недоліком «сухих» фрикційних пристроїв, окрім підвищеного зношування, є різке зниження їхньої ефективності у випадку наявності мастила на поверхні тертя дисків, розміщених у безпосередній близькості від підшипників, що сильно змащуються, шестерень, валів та ін.

Перспективнішими в цьому випадку є фрикційні пристрої, що не потребують відділення системи їх змащення від системи змащення інших деталей, механізмів і вузлів.

Основні переваги мастильних фрикційних пристроїв полягають у:

- плавності вмикання;

- високій зносостійкості й довговічності;
- легкості та надійності охолодження;
- спрощенні герметизації.

Одним із недоліків цих пристроїв є зниження фрикційної ефективності. Динамічний коефіцієнт тертя спечених фрикційних матеріалів в умовах змащування становить максимум 0,08...0,10, тобто він приблизно у три рази нижчий від коефіцієнта тертя без мастила. Внаслідок цього виникає необхідність компенсації нижчого коефіцієнта тертя матеріалу збільшенням діаметра дисків, їх кількості або підвищенням питомого навантаження на поверхні тертя. Збільшувати розміри дисків або їх кількість непрактично, тому найчастіше вдаються до підвищення тиску у фрикційних пристроях до 6...8 МПа. Порошкові спечені матеріали в мастилі у пристроях можуть працювати за швидкостей до100 м/с, а в окремих випадках – і вищих.

У фрикційних пристроях, що експлуатуються в умовах мастильного середовища, переважно застосовують матеріал марки МК-5. Коефіцієнт тертя цього матеріалу залежно від умов роботи коливається в межах 0,04...0,07.

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

Крім матеріалів типу МК-5 застосовують композити, що містять домішки муліту, бентоніту й азбесту, що за певних умов характеризуються вищими коефіцієнтами тертя, ніж матеріал МК-5.

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

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

Однією з найважливіших переваг вуглецевих матеріалів є їх мала маса. У разі їх використання, наприклад, у літаках класу Іл-96 економиться до 1,5 т польотної маси порівняно з фрикційною металокерамікою.

Вуглецеві диски застосовують у більш, ніж 60% авіаційних коліс, що експлуатуються сьогодні. Намітилася тенденція до їх використання не тільки в найважчих і швидкісних літаках, а й і близькомагістральних літаках, а

також у малих літаках бізнес-класу. Лише ВВКМ, використані в гальмах і зчепленні, можуть витримувати навантаження, що виникають в автомобілях класу «Формула-1». Їх застосовують і в інших спортивних та великовантажних автомобілях, а також в мотоциклах, високошвидкісному залізничному транспорті.

Вуглець-вуглецевовмісні фрикційні матеріали (ВВФМ) є армованими композитами, що містять вуглецеві волокна, які орієнтовані переважно паралельно робочим поверхням гальмівних дисків, і вуглецеву матрицю. Для їх виготовлення можна застосовувати вуглецеві волокна, отримані з віскози, поліакрилонітрилу (ПАН) і пеку. За рядом технічних і економічних причин перевага найчастіше віддається вуглецевим волокнам на основі ПАН. Фрикційні матеріали армують як дискретними, так і безперервними волокнами.

Фрикційні диски можуть бути секторними (рис. 11.1*а)* і повністю вуглецевими (рис. 10.1*б)*. Сектори з ВВФМ установлюються в металевих чашках, закріплених на несучому сталевому диску (рис. 11.1*а)*. Такі диски взаємозамінні з металокерамічними. До їх недоліків належать порівняно невеликий виграш у польотній масі, небезпека викривлення несучих дисків і чашок за великих термічних навантажень і обмежений ресурс, зумовлений обмеженою товщиною виступаючого за межі чашок шару вуглецевих секторів, що зношується. Нові ВВФМ дають змогу створювати повністю вуглецеві диски (рис.10.2б), позбавлені зазначених недоліків.

З експлуатаційних чинників найбільшою мірою на коефіцієнт тертя впливає кінематична енергія, що поглинається під час гальмування. Вона залежить від швидкості початку гальмування і загальмовуваної маси.

У разі переходу від одного маневру до іншого коефіцієнт тертя змінюється більш ніж на порядок. Ця енергія під час рулювання – 0,1 кДж/см^2, за нормальних посадкових гальмувань – 3,5 кДж/см^2, а в разі аварійних гальмувань – близько 10 кДж/см^2.

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°С.

а) *б)*

Рисунок 11.1. Секторні (а) і повністю вуглецеві (б) гальмівні диски

Працездатність гальмівних пристроїв з фрикційними вуглецевими матеріалами істотно знижується у разі потрапляння на робочі поверхні дисків у разі недотримання необхідних заходів поводження зі спеціальними рідинами (миючими, протиобледенілювальними та ін.), які застосовують для обслуговування літаків.

Коефіцієнт тертя в цьому випадку знижується в результаті адсорбції на робочих поверхнях продуктів розкладання – летких оксидів, які з охолодженням знову конденсуються в порах, і під час подальших гальмувань описаний ефект повторюється.

За механічними характеристиками ВВФМ близькі до конструкційних вуглепластиків. За високих температур вуглецеві композиції схильні до окиснення. На відміну від фрикційної металокераміки, на поверхні якої у процесі нагрівання утворюються тверді оксидні плівки, що позитивно впливають на тертя, окиснення вуглецю киснем повітря, що починається за температури понад 500°С, відбувається з утворенням газоподібних продуктів. Цей процес прискорюється з підвищенням температури і підсилюється наявністю відкритих, доступних для кисню пор, що додатково розвиваються у міру окиснення. Спочатку окиснюються бічні (неробочі) поверхні, а у міру збільшення кількості експлуатаційних циклів процес окиснення поширюється в шари, що найбільше нагріваються, розміщені під робочими поверхнями, 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, 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.

11.2.3. Методи створення нових фрикційних матеріалів

Висока зносостійкість фрикційних матеріалів визначає економічність експлуатації і їх надійність у роботі машин і механізмів, де їх застосовують.

Зусилля, спрямовані на підвищення зносостійкості матеріалів, насамперед пов'язані із заходами боротьби проти надмірного підвищення температури на поверхні тертя і схоплювання. Згідно з І.М. Федорченком підвищити зносостійкість можна за трьома основними напрямами:

1) удосконалення властивостей безпосередньо фрикційного матеріалу;
2) удосконалення конструкцій гальмівних або передавальних пристроїв;
3) регламентація умов експлуатації.

І.В. Крагельський вважає, що розробляючи фрикційні матеріали, необхідно враховувати такі основні положення.

Для зниження інтенсивності зношеності необхідно:

• забезпечити додатний градієнт механічних властивостей по глибині від поверхні тертя, що убезпечить поверхню від руйнування в результаті глибинного виривання;

• щоб матеріал у контактній зоні чинив опір багаторазовому передеформуванню.

Для забезпечення додатного градієнта механічних властивостей по глибині, здатності чинити опір передеформуванню, зниженню місцевого питомого тиску, а тим самим і поверхневих температур, доброї припрацьовуваності поверхневий (робочий) шар має бути достатньо пластичним.

Для отримання високого і стабільного коефіцієнта тертя проміжний робочий шар має бути особливої гетерогенної структури із властивостями, що забезпечують великий коефіцієнт внутрішнього тертя за високих температур, а також не мати пошкоджень поверхні тертя основних матеріалів.

11.3. Зносостійкі матеріали

До цієї групи належать матеріали:

• високої твердості;
• стійкі до абразивного зношування;
• стійкі до втомного зношування;
• стійкі до зношування в умовах високих тисків і великих ударних навантажень.

До матеріалів високої твердості належать:

• тверді сплави;
• мінералокерамічні матеріали;
• надтверді матеріали.

Тверді сплави бувають литі й порошкові. До литих твердих сплавів належать стеліти (2,5% Si, 40% Cr, 13–17% W, 50–55% Co, HRC 65); сталініти (10% Si, 18% Cr, 15% Mn, 57% Fe, HRC 65).

Порошкові тверді сплави поділяють на чотири групи:вольфрамові (ВК3, ВК4, ВК6, ВК8, ВК10, ВК20, ВК25, ВК40);

1) титановольфрамові (Т30К4, Т15К6, Т14К8, Т5К10, Т15К12);
2) титанотанталовольфрамові (ТТК12, ТТ8К6, ТТ10К8-Б, ТТ20К9);

3) безвольфрамові й безкобальтові (ТНМ – КНТ).

Перші три групи спечених твердих сплавів складаються з карбідів тугоплавких металів (WC, Ti, Ta), зв'язаних кобальтом, і належать до вольфрамовмісних сплавів (табл. 11.13).

Таблиця 11.13

Хімічний склад та властивості деяких спечених твердих сплавів

Група	Сплав	Склад шихти,%				σ, МПа	HRA
		WC	TiC	TaC	Co	Не менше	
Вольфрамова	ВК3	97	—	—	3	1100	89,5
	ВК4	96	—	—	4	1400	89,5
	ВКВ6К	94	—	—	6	1500	88,5
	ВК8	92	—	—	8	1600	87,5
	ВК10	90	—	—	10	1650	87
	ВК15	85	—	—	15	1800	86
	ВК20	80	—	—	20	1950	84
	ВК25	75	—	—	25	2000	82
Титановольфрамова	Т30К4	66	зо	—	4	950	92
	Т15К6	79	15	—	6	1150	90
	Т15К10	85	5	—	10	1400	88,5
Титанотанталовольфрамова	ТТ7К12	—	4	3	12	1650	87
	ТТ8К6	—	6	2	6	1250	90,5

Структура вольфрамових сплавів являє собою частинки карбідів вольфраму *WC*, зв'язані кобальтом. Титановольфрамові сплави складаються з карбідів *WC* і *TC*, зв'язаних кобальтом. За високого вмісту карбіду титану (*Т30К4*) структура складається тільки з карбіду титану і кобальту, тому що вольфрам і вуглець розчиняються в карбіді титану. Чим більше у твердому сплаві кобальту і дрібніші карбідні частинки, тим вища зносостійкість, але нижча міцність і опір ударам.

Безвольфрамові тверді сплави (переважно *TiC—Ni—Mo*), оскільки не містять вольфраму, значно дешевші порівняно з вольфрамовмісними. Існують численні модифікації цих основних груп як за складом (наприклад, феротитаніт), так і за технологією (гарячопресовані, тверді сплави з покриттями та ін.) і структурою (легкозернисті тверді сплави). Основні властивості твердих сплавів: висока твердість (92 НКА), зносостійкість, міцність (у разі вигину – до 3000 МПа, у разі стиснення – до 6000 МПа), теплостійкістю (800...1000°С).

Тверді сплави характеризуються також високим модулем пружності (до $6{,}8*10^5$МПа). До недоліків твердих сплавів належать висока крихкість, а також складність виготовлення фасонних виробів. Слід зазначити, що нанесення покриттів дає змогу істотно (іноді до 10 разів) підвищити їхню

зносостійкість.

Тверді сплави застосовуються для виготовлення різального і пресового інструментів, робочих органів прокатних станів та ін. За експлуатаційними властивостями вони перевершують інструменти зі швидкорізальних сталей і застосовуються здебільшого для обробки матеріалів різанням з високими швидкостями.

З групи сплавів ВК найбільшу зносостійкість мають сплави ВК3, які застосовуються для обробки за високих швидкостей різання чавуну, кольорових металів і неметалевих матеріалів. Сплави ВК4, ВК6, ВК8 застосовують для чорнової обробки матеріалів.

Сплави ВК10 і ВК15, що мають завдяки підвищеному вмісту кобальту вищу в'язкість, використовують для волочильних і бурових інструментів, стійкість яких у десятки разів перевищує стійкість сталевих інструментів. Сплави з високим умістом кобальту (ВК20 і ВК25) застосовують для виготовлення штампових інструментів.

Сплави другої групи характеризуються вищою, ніж сплави першої групи, теплостійкістю (до 100°С), що підвищується в міру збільшення кількості карбіду титану. Їх зазвичай застосовують для високошвидкісного різання сталей.

Для титановольфрамових сплавів найвищу зносостійкість має сплав Т30К4. Експлуатаційна міцність сплавів Т15К6, Т5К10 вища, а зносостійкість і припустима швидкість різання нижча. Титановольфрамові сплави застосовують для чистого (Т30К4) і чорнового (Т15К6, Т5К10) загострювання, фрезерування і стругання сталі.

Сплав ТТ10К8-Б за помірної зносостійкості має високий опір ударам і високу експлуатаційну міцність. Титанотанталовольфрамові сплави від попередньої групи відрізняються більшою міцністю і кращою опірністю вібраціям і викроюванням. Їх застосовують для найбільш трудомісткого різання (чорнова обробка сталевих сплавів, виливків, кувань) важко оброблюваних матеріалів, у тому числі жароміцних сплавів і сталей (НКС 87-90).

Тверді сплави отримують пресуванням порошків карбідів і кобальту у вироби необхідної форми і наступним спіканням за температури 1250...14500°С в атмосфері водню або у вакуумі.

Тверді сплави частіше виготовляють у вигляді стандартних пластин різної форми для оснащення різців, фрез, свердел та інших різальних інструментів, а також різних матриць для пресування напівфабрикатів і волочіння дроту.

Безвольфрамові й безкобальтові сплави складаються з карбіду титану, карбіду хрому, карбонітриду титану, нікелю і молібдену.

Мінералокераміка являє собою композицію, добуту методом порошкової металургії. Основою цих композицій є оксиди, карбіди, нітриди й ін. Основні мінералокерамічні матеріали – це оксидно-карбідні (УЗ, ВОК-

60, ВОК-63, ЦМ-332), безоксидні (Si_3N_4, *Si*, B_4C, *DN*, *Ti*).

Надтверді матеріали застосовують для оснащення (вставками) лезових інструментів (різців, свердел, торцевих фрез) для механічної обробки. Їхня твердість і зносостійкість значно вищі, ніж твердих сплавів, мінералокераміки і швидкорізальної сталі.

Основними надтвердими матеріалами є синтетичні алмази і кубічний нітрид бору (КНБ). За твердістю синтетичний алмаз у шість разів перевершує твердість карбіду вольфраму й у вісім разів – твердість швидкорізальної сталі. За твердістю КНБ не поступається алмазу, але перевершує його за теплоємністю (1200°С) і хімічною інертністю.

Синтетичні алмази полікристалічної будови відрізняються від монокристалів меншою крихкістю і стійкістю. Їх застосування обмежується високою адгезією до заліза, що є причиною його низької зносостійкості в умовах плинності сталей і чавунів. Більшу універсальність мають інструменти з КНБ. Оскільки КНБ не має хімічної спорідненості із залізом, це дає змогу ефективно використовувати його для обробки різних важкооброблюваних сталей, зокрема цементованих і загартованих (НКС>60). При цьому високошвидкісні загострювання загартованих сталей може замінити шліфування, скорочуючи у 2–3 рази час обробки і забезпечуючи низьку шорсткість поверхні.

Матеріали, стійкі до абразивного зношування. В умовах абразивного зношування провідними є процеси багаторазового деформування поверхні ковзними по ній частинками і мікрорізання. У цих умовах найбільшу зносостійкість мають матеріали, структура яких складається з твердої карбідної фази й високоміцної матриці, що утримує їх. Таку структуру має велика група сталей і сплавів.

У найважчих умовах роботи застосовують карбідні сплави. У промисловості застосовується більше ста складних за хімічним складом литих і наплавних матеріалів. Вони являють собою сплави з високим умістом вуглецю (до 4%) і карбідотворних елементів (*Cr, W, Ti*).

Для деталей, що працюють без ударних навантажень, застосовують сплави **з** мартенситною структурою. До них належать сплави типу В25Х38, У30Х23М2С2Е. Деталі, що працюють у легших умовах зношування, виготовляють з низько- і середньовуглецевих сталей, що піддаються загартуванню, цементації й азотуванню.

Матеріали, стійкі до втомного виду зношування. В умовах утомного зношування працюють зубчасті колеса, підшипники кочення й ін. Матеріали, з яких виготовляють ці деталі, повинні мати високу твердість, зносостійкість, опір контактним циклічним напруженням стискання, високу контактну витривалість.

Кульки, ролики і кільця підшипників, що працюють в умовах утомного зношування, виготовляють з недорогих технологічних хромистих сталей ШХ4, ШХ 15, ШХ15ГС і ШХ20ГС.

Для виготовлення високошвидкісних підшипників застосовують сталі після електрошлакового переплаву ШХ-15Ш, що вирізняються найвищою однорідністю будови.

Деталі великогабаритних роликових підшипників діаметром 0,5...2 м (для прокатних станів, електричних генераторів) виготовляють зі сталей 12ХН3А, 12Х2Н4А, піддаючи їх цементації на велику глибину (3...6 мм).

З корозійно-стійких хромистих сталей 95Х18 виготовляють підшипники, що працюють в агресивних середовищах.

Зубчасті колеса, що працюють в умовах високих контактних навантажень, виготовляють з цементованих (нітроцементованих) легованих сталей.

Сильнонавантажені зубчасті колеса діаметром 150...600 мм і більше виготовляють із хромонікелевих сталей 20ХН3А, 12ХН4А, 18Х2Н4МА й ін. Їх використовують у редукторах вертольотів, суден, літаків. Для дрібних коліс приладів, сільськогосподарських машин застосовують хромисті сталі 15Х, 15ХФ, 20ХР й ін.

Для масового виробництва (авто- і тракторобудування) застосовують ощадливі леговані сталі (18ХГТ, 30 ХГТ, 25 ХГМ, 20 ХНМ, 20 ХГР і ін.), що піддаються нітроцементації.

Зубчасті колеса, які працюють за невисоких навантажень, виготовляють зі сталей 40, 50, 40Х, 40ХН та інших після нормалізації та поліпшення.

Для гвинтових передач і невеликих зубчастих коліс, що працюють за малих навантажень і швидкостей, застосовують неметалеві матеріали: текстоліт ПТ і ПТК, деревношаруваті пластики, поліаміди – капрон, нейлон. Їх використовують для приводів спідометрів і розподільних валів автомобілів, кіноапаратів, текстильних і харчових машин. Перевагою таких машин є відсутність вібрацій і шуму, висока хімічна стійкість.

Матеріали, стійкі до зношування в умовах великих тисків і ударних навантажень. У таких умовах працюють траки гусеничних машин, хрестовини залізничних рейок, ковшів екскаваторів та інших деталей. Їх виготовляють з високомарганцевої аустенітної сталі. Висока зносостійкість цієї сталі зумовлена здатністю аустеніту до сильного деформаційного зміцнення (наклепу).

Слід зазначити, що зносостійкість сталі 110Г13Л максимальна, коли вона має однофазну структуру аустеніту. Таку структуру забезпечують загартуванням у воді від 1100°С. Після загартування сталь має низьку твердість (НВ 200) і високу в’язкість.

Якщо така сталь під час роботи зазнає лише абразивного зношування, то виявляється незносостійкою. В умовах впливу в поверхневому шарі сталі утворюється велика кількість дефектів кристалічної побудови (дислокацій, дефектів упакування). У результаті твердість поверхні підвищується до НВ 200, і сталь стає зносостійкою.

В умовах кавітаційного зношування також застосовують аустенітні

сталі. Сталі з нестабільною структурою аустеніту (08Х18Н10Т, 30Х10Т10 і ін.) при ударному впливі також наклепуються і частково мартенситно перетворюються, на розвиток чого витрачається енергія удару. Поверхневе зміцнення цих сталей в умовах експлуатації запобігає утворенню втомних тріщин.

Ущільнювальні матеріали. Підвищене нерівномірне зношування деталей ущільнюваних елементів призводить до збільшення радіальних зазорів, спотворення структури потоку й у цілому до падіння потужності турбіни й погіршення її економічності, хоча це і не є причиною для зняття двигуна в ремонт.

Однак у випадку ремонту двигуна після будь-якого напрацювання ущільнювальні вставки соплових апаратів замінюють на нові, що спричиняє додаткові витрати часу і засобів.

У системі лопатки турбіни – ущільнювальні вставки спостерігається таке: на вставках другого ступеня, крім дефектів першого ступеня, трапляються сліди газової ерозії. На вставках інших ступенів ці дефекти трапляються рідше.

Працездатність ущільнювальних матеріалів проточної частини газових турбін значною мірою визначає надійність, економічність і ресурс авіаційного двигуна в цілому. Тому роботи спрямовано на вивчення їхніх експлуатаційних характеристик, процесів ерозійного зношування і тертя ковзання складових даної трибосистеми, а також на розроблення нових матеріалів, особливо актуальних у зв’язку з різким збільшенням ресурсу двигунів до 1000 год.

Матеріали для торцевих ущільнень. Торцеві ущільнення в різних машинах і установках працюють у широкому діапазоні швидкостей (1...150 м/с), навантажень (0,5...3 МПа) і температур (–50...+500°С). Для виготовлення нерухомих кілець торцевих ущільнень застосовують графітові матеріали, а для обертових елементів ущільнення – термічно оброблені сталі, чавуни, бронзи, стеліт, композиційні матеріали, керамічні покриття та ін.

Однак графітові матеріали у ряді випадків не забезпечують надійної роботи ущільнень через низьку міцність графіту, підвищене зношування під час роботи у вакуумі і нейтральних газах, а також в умовах руйнування під дією вібрацій, утворення електролітичних активних пар, що викликає інтенсивне зношування графіту і металу.

Для виготовлення елементів торцевих ущільнень перспективні композиційні матеріали, виготовлені методом порошкової металургії. Вибір матеріалу визначається умовами роботи вузла тертя і характером ущільнювача рідких або газових середовищ, у контакті з якими він працює. Для кожного конкретного випадку матеріал ущільнень має відповідати таким основним вимогам: низькі значення коефіцієнта тертя; висока зносостійкість; корозійна стійкість у робочих середовищах; задовільна припрацьовуваність;

достатня механічна міцність; мала проникність.

Торцеві ущільнювачі виготовляють з матеріалів, працездатних за підвищених і високих швидкостей ковзання і температур, що мають необхідні корозійну стійкість і густину.

Як матеріал для торцевих ущільнювачів використовують антифрикційний спечений матеріал ЖГрЗЦс4 на основі заліза з додаванням 3% графіту і 4% сірчистого цинку, що має перлітну структуру з 5%-м умістом цементу. Як ущільнення для балансирів ковзання тракторів успішно використовуються кільця із залізографіту ЖГр-1,5.

До групи ущільнювальних матеріалів належать матеріали з високим умістом графіту, у яких для їх зміцнення і зниження крихкості вводиться пластичний метал або сплав. Для торцевих ущільнень використовують також спечені матеріали на основі заліза, нікелю, міді й інших металів, що містять легувальні та антифрикційні присадки. Такого типу матеріали застосовують переважно для ущільнення газових і рідких середовищ з підвищеними температурами.

Матеріали для радіальних ущільнень. Ці матеріали застосовують для ущільнення силової частини газових і парових турбін, що працюють в умовах високих температур і тисків газового потоку при звукових і надзвукових швидкостях обдування з періодичним врізуванням пера лопаток або гребеня лабіринтів ротора турбіни в матеріал ущільнювального кільця або лабіринтового ущільнення.

У газових турбінах температура газового потоку становить 400...850°С і більше, швидкість потоку перевищує 100...200 м/с, а в соплових апаратах першого ступеня досягає 300 м/с. Газовий потік має окисний характер (продукти згорання рідкого палива з надлишком повітря або суміш газів складом 74% N_2, 14% C_2 і 2% H_20). У парових турбінах ущільнювальні матеріали омиваються потоком пари зі швидкістю 200...250 м/с за температур 500...585°С і тиску 90...240 атм. Водяна пара здатна окиснювати матеріалущільнювальних уставок, оскільки за високої температури розкладається на кисень і водень, парціальний тиск яких збільшується з підвищенням температури.

Виходячи з умов роботи ущільнювачів у турбінах, до матеріалу, розроблюваного для їх виготовлення, ставлять такі основні вимоги:

- властивості і структура матеріалу в процесі тривалої роботи повинен бути стабільними;
- матеріал повинен бути стійкий проти окиснення й корозії за робочих температур;
- матеріал повинен мати оптимальну механічну міцність, достатню для забезпечення легкого врізування робочих гребенів у момент зіткнення і їх мінімального зношування;
- матеріал не повинен навиватися на гребені;
- значення коефіцієнтів лінійного розширення матеріалу ущільнень обойми турбіни мають бути близькі, щоб уникнути розтріскування у процесі

роботи під дією термопружних напружень.

Нині у вітчизняному енергомашинобудуванні застосовують матеріали на основі нікелю, міді і сплавів на їхній основі з домішками графіту, нітриду бору і деяких інших наповнювачів у композиційних матеріалах. Наповнювач повинен мати малі твердість і міцність, не взаємодіяти з основою матеріалу в процесі роботи.

Таким вимогам до міді й нікелю відповідають графіт, оксид цинку, тальк, нітрид бору, слюда.

Для виготовлення ущільнювальних уставок застосовують матеріал марки С-137, однак він має обмежену працездатність за високих температур у результаті вигорання графіту, підвищення твердості і погіршення припрацьовуваності в експлуатації. Заміна графіту нітридом бору, оксидом цинку, слюдою підвищує його жаростійкість. Порошкові ущільнювальні матеріали на основі нікелю також містять графіт, тальк, оксид цинку і нітрид бору. Їх застосовують для виготовлення вузлів ущільнень проточної частини середньо-температурних газових транспортних турбін.

У деяких типах газових турбін з робочою температурою до 950...1000°С застосовується жаростійкий матеріал марки УМБ-4С на основі синтетичної слюди з домішкою 4...8% нітриду бору. Порівняно з іншими ущільнювальними матеріалами він не схоплюється з поверхнею врізуваних лопаток і добре припрацьовується.

У більшості сучасних конструкцій газових турбін ущільнення радіальних зазорів виконують за допомогою м’яких ущільнювальних шарів, виконаних з металокерамічних матеріалів, що дає змогу врізування в їхні деталі ущільнюваних елементів без руйнування.

11.4. **Відновлювальні суміші для регенерації трибосистем**

Проаналізувавши український ринок, можна знайти велике різноманіття торгових марок, які уже успішно виробляють та застосовують технології безрозбірного відновлення ресурсу машин. Такими продуктами є Феном, РиМет, Lubrifilm, PMF-200 , Slider-2000 , MILITEK, Аспект модифікатор, ХАДО, РВС та інші, що супроводжується широкою географією (Україна, США, Великобританія, Росія, Білорусь та інші). У залежності від принципу дії, виробники класифікують свої продукти на ревіталізанти, кондиціонери металу, геоактиватори, геомодифікатори тертя, та інше.

Розглянемо детальніше, які саме компоненти застосовують у своїх продуктах фірми виробники.

РиМет – за класифікацією відноситься до реміталізантів. Принцип дії: розпилені в плазмовій дузі мідь та олово, потрапляючи на поверхні тертя, замість зношеного метала нарощують композиції типу „мідь-олово-срібло”, „мідь-свинець-срібло”, чим сприяють ущільненню зазорів. У даному випадку

розпилені мідь та олово виступають у ролі шарикопідшипника, що помітно зменшує тертя. Незважаючи на швидкий ефект, такий варіант зменшення коефіцієнта тертя не створює постійного захисного покриття, має короткочасний ефект, тобто при тривалому простої машини мікрочастинки об'єднуються в крупнозернисті фракції, тим самим руйнують поверхні тертя металів, що є м'якшими (вкладиші, опорні підшипники ковзання). Тобто, фізичний знос деталей компенсується утворенням на поверхнях тертя плівок важких металів. Суміші цього класу мають визначену „спеціалізацію" відновлення розмірів зношених деталей без розбирання агрегату і використовуються в основному для обробки двигунів з високим ступенем зносу.

Аспект-модифікатор, Форум, Універсальний модифікатор, Х-2 – так звані фторопластові присадки, здатні формувати досить слизьке покриття методом осадження на гарячі поверхні тертя, що дозволяє швидко знизити коефіцієнт тертя. Але молекулярній структурі фторопласту в рідкій фазі (перфторполіефір) не притаманні компенсаційні властивості, тобто створюється м'яке покриття, що не витримує динамічних та теплових навантажень. Головним недоліком є те, що фторопласт є активним каталізатором хімічного руйнування металу.

STP-XEP, Super-X whit Teflon, LuquiMoly-MoS – модифікатори тертя, у своєму складі містять дрібнодисперсні частинки речовини або сполук, наприклад, тефлон, дисульфід молібдену і т.д. Принцип дії зводиться до утворення на поверхні тертя плівок, яким притаманний легкий зсув у площині ковзання, що відповідно знижує коефіцієнт тертя, але практично не захищає трибосистему від зносу, строк дії такої присадки обмежується періодом заміни мастила.

ER, ФЕНОМ, Duralyb – відносяться до кондиціонерів металу. До кондиціонерів металу входять солі м'яких металів, спеціальні добавки та витяжки з фторопласту, що діють безпосередньо на трибосистеми, створюючи плівку (сервовитний прошарок) товщиною до 10 мкм, тобто при введенні присадки в оливу на поверхнях тертя формується захисна плівка з чистого заліза, здатна до самовідновлення. На поверхні такої плівки встановлюється динамічна рівновага між активними атомами заліза самої плівки та перехідними залізометалевими комплексами присадки, що залишились в складі оливи. Як результат досягається замкнений цикл „знос-відновлення", що дозволяє перевести процеси тертя в режим беззносності, також додатково можлива конденсація оливи на гарячих поверхнях тертя машини, що сприяє щільному спряженню деталей, захисту від задирів, при цьому знижується і коефіцієнт тертя. Таким способом, завдяки ущільненню

та значному зниженню коефіцієнта тертя, досягається покращення роботи агрегату в цілому. Недоліком є короткостроковий ефект, необхідно заливати присадку після кожної заміни оливи.

Трибо, Трибо-2, Трибо-люкс, Доктор мотор, Lubrifilm, Slider-2000, ХАДО, РВС – металокерамічні відновлювальні суміші. Металокерамічні структури, які утворюють легкі ремонтні покриття із захистом від зносу відновлюють трибосистеми на початковій стадії та надають захист від зносу, але присадки даного класу бояться перегріву та мають малий строк експлуатації, приблизно 30…50 тис. км.

AG – органо-металокерамічна відновлювальна суміш, у якій присутні полімерна керамічна та металоорганічна структури, що здатні до створення на трибосистемах ремонтно-відновлювального покриття, яке додатково дає ще й захист від корозійного зносу, формує міцні зносостійкі шари, але має порівняно невеликий строк експлуатації (50 тис. км).

Всі перераховані вище добавки і присадки до моторних олив, коротка характеристика яких представлена в додатку А, беруть свій початок від фундаментальних робіт І.В. Крагельського і Д.М. Гаркунова.

Дослідження ефекту беззносності дали імпульс розвитку нових технологій підвищення зносостійкості трибосистем. Сервовитні плівки можуть утворюватись на основі металів: мідь, цинк, олово, срібло. Для цього відповідні компоненти повинні бути введені в мастильний матеріал чи робоче середовище. Такий принцип ліг в основу розробки і застосування металоплакувальних мастильних матеріалів.

У 1979 р. швейцарська компанія Actex S.A. уперше почала серійне виробництво металоплакувальних порошкових препаратів марки Lubrifilm, заснованих на практичній реалізації ефекту беззносності й призначених для безрозбірного відновлення трибосистем. Подальшим розвитком цієї групи добавок до олив є російський продукт Римет. На базі металоплакувальних присадок з’явилися методи й засоби для безрозбірного відновлення машин і механізмів Smart-self technologies (інтелектуальні технології самовідновлення).

Всі відомі на цей час методи й засоби для безрозбірного відновлення трибосистем за компонентним складом, фізико-хімічним процесом взаємодії з поверхнею тертя, властивостям отриманих покриттів (захисних плівок), а також механізмом функціонування варто ділити на три основні групи: металоплакувальні композиції (реалізують ефект вибіркового переносу); речовини, які полімеризуються; металокерамічні матеріали. До відновлювальних присадок, які дають найбільший техніко-економічний ефект, варто віднести кондиціонери металу й інші поверхнево-активні

речовини (ПАВ) , а також добавки модифікаторів. Ці продукти відрізняються за умовами й способами застосування.

У роботах фізично обґрунтовано та розроблено технологічний процес електротрибохімічного плакування в композиційній оливі зразків трибосистеми „гільза циліндра – поршневе кільце” шаром міді.

Металографічний аналіз, який представлений у роботах, показав, що покриття міді не повністю займає площу поверхні, а розподіляється локально, в основному, на площадках контакту. Коефіцієнт заповнення залежить від щільності струму, тиску, концентрації гліцерату міді в композиційній оливі.

У залежності від режимів перебігу електротрибохімічного плакування твердість плакованої міддю поверхні змінювалась у межах 180…230 НВ. Вимірювання мікротвердості показало, що в зоні тертя вона в 1,25…1,40 раза більша. Виявлено також, що мікротвердість покриттів при електротрибохімічному плакуванні змінюється за глибиною поверхневого шару: при товщині до 10 мкм твердість зростає з 260 до 650 МПа, а далі її величина не змінюється. Величина встановленої мікротвердості пропорційна навантаженню, має екстремальну залежність від щільності струму.

Фізико-хімічні дослідження складу, структури та властивостей мідної плівки показали, що вона перебуває в неврівноваженому стані й в процесі її формування мають місце ряд ефектів:

– спостерігаються дифузійні процеси як на поверхні (C, O), так і на межі з основним металом з утворенням інтерметаліду Cu-Fe, останнє суттєво підвищує міцність зчеплення;

– підвищена концентрація O і C приводить до зміцнення поверхневого шару міді й істотного зменшення його схильності до схоплювання;

– залежність щільності дислокацій, фізичного поширення рентгенівських ліній міді від параметрів трибопроцесу може призвести до пластифікації нанесеного шару міді при електротрибохімічному плакуванні;

– встановлено, що ефект пластифікування шарів міді, нанесеної при електротрибохімічному плакуванні, більш виражений при збільшенні питомого тиску в трибосистемі.

Застосування композиційної оливи забезпечує зниження початкового зносу деталей у процесі припрацювання сполучень і прискорює формування врівноваженої мікрогеометрії поверхонь тертя (Ra=0,08 мкм) за рахунок утворення тонкого плакувального шару антифрикційного матеріалу при електротрибохімічному плакуванні. Виявлено неоднозначний вплив на шорсткість поверхні тертя щільності струму.

Дослідження показали, що при електротрибохімічному плакуванні з плином часу і збільшенням щільності постійного електричного струму змінюються наступні властивості композиційної оливи: підвищується електропровідність, зменшується величина крайового кута змочування, лужне число та ін.

На відміну від застосування металоплакувальних присадок, іншим методом відновлення зношених трибосистем і підвищення їх триботехнічних характеристик є застосування матеріалів, які містять у своєму складі полімери. Із цієї групи найпоширенішими є продукти на основі політетрафторетилену (ПТФЕ), відомого, як тефлон. За опублікованим даними, ці препарати покривають поверхні тертя, перетворюючи безпосередній контакт „метал – метал” у режим тертя „полімер – полімер” зі значним зниженням коефіцієнта тертя й інтенсивності зношування. Вони широко представлені на ринку препаратами DLX - 600, Slik - 50, Liquid Ring, Lubrilon, Microlon та ін.

Підвищення експлуатаційних характеристик такого роду покриттів може бути досягнуте за рахунок структурної модифікації полімерної плівки, введенням різних наповнювачів, наприклад двокомпонентних смол. Висока зносостійкість таких матеріалів пояснюється самоорганізацією дисипативних рідкокристалічних структур. Гарні результати показали політетрафторетилени, що містять як наповнювачі ультрадисперсні оксиди цирконію ZrO_2 , хрому Cr_2O_3 , алюмінію Al_2O_3 . У роботі аналізуються модифікатори з низьким зусиллям зсуву між шарами, наприклад, ди - й трисульфіди молібдену, диселентит молібдену, дисульфіди вольфраму, танталу ін. При роботі такий модифікатор заповнює й „згладжує” мікронерівності поверхонь тертя, завдяки чому зниження коефіцієнта тертя сягає 50 %.

За хімічним й фазовим складом ревіталізантами є суміш класичного магнезіально-залізистого силікату (серпентиніту $Mg_6\{Si_4O_{10}\}(OH)_8$), що є формою цілого ряду мінеральних руд класу олівінів, кінцевими фазами якого є форстерит (Mg_2SiO_4) і фаяліт (Fe_2SiO_4)), а також, у невеликих кількостях, кремнезем (SiO_2) і доломіти ($CaMg(CO_3)_2$).

Fe і Al, що входять до складу триботехнічних відновлювальних сумішей, є каталізаторами утворення піролітичного вуглецю на границях зерен підповерхневого шару. На поверхнях тертя, за рахунок механохімічної активації аморфної фази двоокису кремнію SiO_2 і атомів металу, утворюється плівка металосилікату. По суті відбувається типова коливальна хімічна реакція модифікування:

$$Mg_6\{Si_4O_{10}\}(OH)_8 + Fe_2O_3 + H_2 \rightarrow 4(MgFe)SiO_4 + 5H_2.$$

Аналогічне рівняння виводиться й для тривалентного алюмінію (Al^{+3}). Як видно з рівняння, на поверхні утворюються кристали металосилікату з об'ємною анізотропною структурою, до того ж зв'язується й віддаляється розчинений у поверхневих шарах металу водень, тим самим запобігаючи водневому окрихчуванню деталі.

Варто зазначити, що хімічна складова утворення металокерамічного шару, з ревіталізантів розроблена досить ґрунтовно в роботах , чого не можна сказати про фізико-механічні й реологічні властивості цього шару. Такі розробки практично відсутні. Автори робіт наводять показники ударної міцності й твердості обробленої металокерамічної поверхні. Доводячи квазірідкий стан металокерамічної плівки на поверхні тертя, в опублікованих роботах абсолютно виключають можливість еластогідродинамічного ефекту, що, очевидно, має місце при роботі металокерамічного шару. Глибоких металофізичних досліджень поверхневого й підповерхневого шарів, які сформовані на поверхнях тертя при обробці ревіталізантами, нами у відкритій літературі не виявлено.

Дотепер відсутні дослідження динаміки утворення й руйнування металокерамічного шару на поверхнях тертя при використанні триботехнічних відновлювальних сумішей. Зносостійкі покриття безумовно варто віднести до дисипативних, а значить метастабільних структур. Відомості про стійкість покриттів, отриманих за допомогою таких технологій, також відсутні. Досить різними є відомості про товщину металокерамічних шарів, що утворені на поверхнях тертя: від 0,005 до 0,7 мм

На підставі проведеного аналізу різних добавок до мастильних матеріалів можна зробити висновок: структурні складові різного походження, які входять до складу триботехнічних відновлювальних сумішей, не систематизовані й не мають наукового обґрунтування з точки зору забезпечення зносостійкості поверхневих шарів. Тому обґрунтування структурних складових і визначення оптимального складу нової триботехнічної відновлювальної суміші з сировини вітчизняного походження, дослідження її трибологічних властивостей і розробка науково обґрунтованих рекомендацій щодо використання, є актуальним завданням, яке буде розв'язуватись у даній роботі.