

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з дисципліни «Зносостійкі, фрикційні та антифрикційні матеріали» для студентів освітньої програми «Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і конструкцій» усіх форм навчання

2017

Конспект лекцій з дисципліни «Зносостійкі, фрикційні та антифрикційні матеріали» для студентів освітньої програми «Відновлення та підвищення зносостійкості деталей і конструкцій» всіх форм навчання / Укл. М.І. Андрущенко, О.Є. Капустян. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2017 – 66 с.

Укладачі: М.І. Андрущенко, канд. техн. наук, доцент
О.Є. Капустян, старш. викл.;
Рецензент: М.Ю. Осіпов, канд. техн. наук, доцент
Відповідальний за випуск: О.Є. Капустян

Затверджено
на засіданні кафедри ОТЗВ
Протокол № 1 від 22.08.2017

Рекомендовано до видання
НМК ІФФ
Протокол № 1 від 19.09.2017

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 АНТИФРИКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ.....	5
1.1 Вимоги до матеріалів.....	7
1.2 Види антифрикційних матеріалів.....	8
1.2.1 Металеві антифрикційні матеріали.....	9
1.2.1.1 Сплави на основі олова та свинцю.....	9
1.2.1.2 Сплави на олов'яній основі.....	9
1.2.1.3 Сплави Pb-Sb-Sn - свинцево-кальцієві бабіти.....	10
1.2.1.4 Свинцево-кальцієві бабіти.....	11
1.2.1.5 Сплави на мідній основі.....	14
1.2.1.6 Олов'яністі бронзи.....	15
1.2.1.7 Свинцюваті бронзи.....	18
1.2.1.8 Крем'яністі бронзи.....	20
1.2.1.9 Берилієві бронзи.....	20
1.2.1.10 Алюмінієві бронзи.....	21
1.2.1.11 Латуні.....	23
1.2.1.12 Олов'яністі латуні.....	24
1.2.1.13 Свинцюваті латуні.....	24
1.2.1.14 Алюмінієві латуні.....	24
1.2.1.15 Марганцевисті латуні.....	25
1.2.1.16 Марганцево-свинцеві латуні.....	25
1.2.1.17 Крем'яністі латуні.....	26
1.2.1.18 Цинкові сплави.....	26
1.2.1.19 Алюмінієві сплави.....	28
1.2.1.20 Сплави Al-Cu.....	29
1.2.1.21 Чавуни.....	30
1.2.2 Неметалеві матеріали.....	32
1.2.2.1 Полімерні матеріали.....	32
1.2.2.2 Неорганічні матеріали.....	46
1.2.2.3 Природні антифрикційні матеріали.....	47
1.3 Умови експлуатації підшипників і властивості, які необхідно враховувати при виборі антифрикційних матеріалів.....	48
1.3.1 Характер та величина навантаження.....	49
1.3.2 Конструктивні особливості підшипників.....	50
1.3.3 Змащувальне середовище.....	50

1.3.4 Припрацьовуємість.....	51
1.3.5 Опірність зношуванню.....	52
1.3.6 Сумісність елементів пари тертя	52
1.3.7 Задиристійкість.....	53
2 ФРИКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ.....	54
2.1 Вимоги, що пред'являються до матеріалів.....	54
2.1.1 Припрацьовування	56
2.1.2 Несхоплюємість.....	56
2.1.3 Корозійна стійкість	57
2.1.4 Вогненебезпечність	57
2.1.5 Механічна міцність	58
2.1.6 Зносостійкість.....	58
2.1.7 Стійкість проти теплової втоми.....	58
2.2 Процеси, що відбуваються в матеріалах.....	59
2.3 Види фрикційних матеріалів	61
2.3.1 Органічні фрикційні матеріали.....	62
2.3.2 Фрикційні матеріали одержувані методами порошкової металургії	62
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА	66

ВСТУП

Довговічність деталей машин і устаткування у великій мірі залежить від зносостійкості матеріалів, використаних для їх виготовлення.

Деталі в залежності від умов роботи, виду зношування, виготовляють з конструкційних, зносостійких, антифрикційних і фрикційних матеріалів.

У багатьох випадках матеріали наносять у виді покриттів, плівок або накладок на деталі з конструкційного матеріалу.

З усіх пар тертя підшипники ковзання викликали, свого часу, найбільшу складність у забезпеченні їх тривалої роботи в силу високих питомих навантажень при порівняно великих швидкостях ковзання. Для таких підшипників були розроблені сплави з малим коефіцієнтом тертя, що отримали назву антифрикційних.

Однак існує ряд найважливіших вузлів машин, робота яких немислима без тертя - це гальма, фрикційні муфти, паскові передачі. У цих пристроях робочі поверхні деталей облицьовують спеціально створеними матеріалами, що мають високий коефіцієнт тертя, званими фрикційними.

Умовно прийнято називати матеріали з коефіцієнтом тертя $f > 0,2$ - фрикційними, а з $f < 0,2$ - антифрикційними.

Як фрикційні, так і антифрикційні матеріали повинні бути зносостійкими і міцними, забезпечувати надійність і довговічність машин в межах проектного терміну служби.

1 АНТИФРИКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

Антифрикційні матеріали, так само як і фрикційні, відрізняються за своїми властивостями в залежності від їх призначення. Найбільш численною групою є матеріали, призначені для підшипників ковзання.

У підшипниках ковзання при нормальній роботі часто присутнє рідке або консистентне мастило, яке надійно оберігає поверхню тертя від утворення металевих зв'язків.

Однак в пусковому режимі, коли ще не встиг утворитися мастильний клин і поверхні розділяються тонким шаром мастила. При перевантаженні, що має місце при форсованих режимах, плівка мастила сильно стоншується, в зв'язку з чим, може легко виникнути схоплювання поверхонь і подальше заїдання їх. Застосування низкоплавких металів оберігає від цього.

У ряді випадків застосування рідких і консистентних мастил виявляється неефективним або взагалі неможливим. Наприклад, робота вузлів тертя у відновлювальних середовищах (в рідкому водні) виключає утворення на поверхні тертя окисної плівки, що перешкоджає схоплюванню деталей, що труться.

Спільна присутність мастил та інших органічних речовин з рідким киснем і іншими сильними окислювачами взагалі виключається, тому що призводить до займання. Наявність навіть незначних кількостей мастила неприпустима в кінопроекційній, звукозаписній апаратурі, а також в механізмах контролю, управління і т.п.

Це призводить до необхідності застосування матеріалів, що забезпечують роботу вузлів тертя без рідкого або консистентного мастила.

Тривалий час основними матеріалами для підшипників ковзання були білі метали: сплави на основі олова і свинцю; кадмію, м'які сплави алюмінію; міді та свинцю. Плівки оксидів, що виникають на поверхні міді і бронзи, є вельми хорошим мастилом. Цим пояснюється широке застосування міді в якості антифрикційних матеріалів.

Захисну плівку, що грає роль мастила, можна створити домішуючи до сплавів графітові порошки, дисульфід молібдену та інші тверді мастильні матеріали.

При високій точності виготовлення вузлів можна використовувати жорсткі підшипникові матеріали, що різко підвищує їх зносостійкість.

Поліпшення умов змащення і створення гідростатичного тиску в мастильній системі, що забезпечує спливання вала при пуску двигуна, дозволяє безпечно застосовувати тверді, зокрема хромовані підшипники.

1.1 Вимоги до матеріалів

Вимоги, що впливають з технології їх обробки і тривалої експлуатації:

— здатність матеріалів легко піддаватися механічній обробці, проста технологія їх отримання, відсутність в їх складі дорогих компонентів;

— стабільне значення коефіцієнтів тертя;

— здатність матеріалів швидко припрацьовуватись, низький знос, рівномірний розподіл його за номінальною площею контакту;

— корозійна стійкість, теплостійкість, хороша теплопровідність, теплоємність, низький коефіцієнт теплового розширення;

— продукти зносу не повинні бути абразивні, токсичні і небезпечні в пожежному відношенні.

Крім того, антифрикційні матеріали мають бути міцними, забезпечуючи переважно пружний контакт, зберігати працездатність вузла при ненадійному мастилі. У ряді випадків, коли через контакт пропускаються великі струми (наприклад, в роликівих машинах контактного зварювання $I_{\max} = 100$ кА), треба застосовувати матеріали з низьким електроопором. Вони не повинні в ході зберігання і експлуатації зазнавати фазові перетворення, що призводять до зміни фізико-механічних властивостей.

Щоб уникнути виникнення холодного зварювання під час тривалих зупинок і при порушенні захисного прошарку, ці матеріали не мусять мати хімічної спорідненості з контртілом.

Основною властивістю антифрикційної пари тертя є наявність позитивного градієнта механічних властивостей по глибині в поєднанні з пружною деформацією. При пластичній деформації - здатність до багаторазового передеформування, що не приводить до ламкості матеріалу.

Забезпечення позитивного градієнта механічних властивостей створюється рідкими консистентними і твердими мастилами. Однак за відсутністю мастил позитивний градієнт повинен створюватися поверхневим шаром самого антифрикційного матеріалу.

Для цього існує кілька шляхів:

— матеріал утворює оксидну плівку більш пластичну, ніж

основа.

— матеріал виділяє один або кілька своїх компонентів, які мають пластичну і легкоплавку плівку.

— на поверхню матеріалу наносять покриття з міцної та легкоплавкої речовини: металу, пластмаси, твердого змащення (дисульфід, диселеніум, графіт і ін.).

Великий вплив на властивості і стійкість антифрикційних матеріалів може надавати їх структура.

В 1897 році Шарпі сформулював правило, згідно з яким структура антифрикційних сплавів повинна бути гетерогенною, що складається з більш м'якої та пластичної основи з включенням твердіших частинок. При обертанні вал спирається на тверді частинки, що забезпечують зносостійкість, а основа, яка стирається швидше, притирається до валу і утворює мережу мікроскопічних каналів, по яких циркулює мастило і несуться продукти зносу.

Це правило справедливо для бабітів, розроблених в 40-х роках 19 століття, однак згодом були створені сплави, у яких навпаки, м'які включення свинцю були розподілені в більш твердій основі (свинцювата бронза).

В даний час в якості антифрикційних матеріалів застосовують і однорідні матеріали - метали і пластмаси.

Таким чином, питання оптимальної структури антифрикційних матеріалів є більш складним, ніж в правилі Шарпі і його треба вирішувати для кожного конкретного вузла тертя.

1.2 Види антифрикційних матеріалів

Існують наступні види антифрикційних матеріалів:

- а) металеві;
- б) природні;
- в) полімерні;
- г) змащувальні композиції;
- д) металокерамічні.

1.2.1 Металеві антифрикційні матеріали

1.2.1.1 Сплави на основі олова та свинцю

В 1839 р. Ісаак Баббіт отримав патент на конструкцію підшипника, в якому він запропонував внутрішню частину його покривати сплавом на олов'яній основі. Британський метал, що застосовувався в той час для відливання столового посуду, містив 89 % Sn; 9 % Sb; 2 % Cu.

На ім'я Баббіта, першим запропонувавшим конструкцію підшипника із заливкою м'яким металом, всі сплави на основі олова або свинцю стали називатися бабітами.

1.2.1.2 Сплави на олов'яній основі

Ці матеріали мають найвищі антифрикційні властивості в порівнянні з іншими металами для заливки підшипників. Найбільшого поширення з них отримав сплав олова з сурмою - олов'яні бабіти.

Ці сплави утворюють 3 твердих розчина:

- твердий розчин γ на основі олова, що містить до 10 % сурми;
- твердий розчин β , що містить 42-58 % олова;
- твердий розчин α на основі сурми, що містить до 4 % олова.

Сплави Sn-Sb з вмістом до 7 % сурми в своїй структурі мають тільки одну складову - твердий розчин γ .

При збільшенні вмісту сурми понад 7% з'являється друга складова - кубічні кристали твердого розчину β (хімічна сполука $SbSn$), рівномірно розташована на кордоні твердого розчину γ . При цьому необхідно, щоб кубічні кристали хімічного з'єднання $SbSn$ не стикалися один з одним, а були б оточені основною пластичною масою-твердим розчином γ . Якщо кубічні кристали будуть стикатися один з одним, що може трапитися при утриманні олова понад 20 %, сплав набуває небажану крихкість.

Присадка сурми викликає значне підвищення твердості сплаву.

Не дивлячись на хороші антифрикційні властивості, сплави олова з 10-20 % сурми не знайшли широке застосування, тому що важко отримати однорідну будову цих сплавів через ліквідацію

кубічних кристалів SbSn , які мають меншу питому вагу, ніж рідкий розплав, з якого вони викристалізуються.

Для усунення ліквациї і підвищення механічних властивостей сплаву необхідна добавка третього компонента - Cu або Ni .

Мідь, в невеликих кількостях, переходить в твердий γ -розчин, що містить 7% Sb , завдяки чому, твердість його підвищується.

При надлишку Cu в структурі сплаву з'являються дуже тверді кристали Cu_3Sn або Cu_6Sn_5 , які мають форму голок або зірок. Наявність цих кристалів також збільшує загальну твердість сплаву.

При роботі в підшипниках крихкі голки Cu_3Sn дають масу дрібних осколків, які є полірувальним матеріалом, як для кристалів SbSn у бабіті, так і для шийки вала.

Можливість утворення рисок при цьому виключена, завдяки мікроскопічним розмірам Cu_3Sn .

Основна роль кристалів Cu_3Sn полягає в тому, що вони, виділяючись з рідкого розплаву першими, утворюють як би скелет, щоб механічно утруднювати ліквацию кубічних кристалів SbSn , внаслідок чого кристалізація останніх відбувається більш рівномірно і розміри їх дрібніші, крім того, кристали Cu_3Sn підвищують зносостійкість сплаву.

Сприятливий вплив міді позначається при 2-10 %; при більшому її вмісті сплав стає занадто тендітним внаслідок великої кількості великих скупчень крихких кристалів, які самі починають ліквацию.

1.2.1.3 Сплави Pb-Sb-Sn - свинцево-кальцієві бабіти

Чистий Pb має дуже малу твердість і міцність, тому під навантаженням від шийки вала він може бути видавлений з підшипника. Для підвищення твердості і міцності Pb необхідно вводити в нього легуючі компоненти.

Найкращу дію на Pb надають добавки Sn і Sb . Вміст Sn в свинцевосурм'яних бабітах, зазвичай, не перевищує 16%, і тому їх називають малоолов'янистими.

Sb з Pb утворює обмежений твердий розчин з максимальною

розчинністю 2,5 % і евтектики з вмістом сурми близько 13 %.

Сплави, що містять менше 13 % Sb, складаються з кристалів твердого розчину Sb в Pb і евтектики. Сплав, з близько 13 % Sb, містить тільки одну евтектику. Якщо кількість сурми в сплаві більше 13 % в структурі сплаву з'явиться нова складова - надлишкові кристали Sb кубічної форми.

У сплавах Pb-Sb, що містять $Sb \leq 13$ %, основна складова настільки пластична, що при невеликих навантаженнях видавлюється, і вкладиш деформується.

Сплави, з $Sb > 14$ %, мають більш високу твердість, але меншу ударну в'язкість, що ускладнює можливість застосування їх. Так сплав Pb з 17% Sb має питому в'язкість $0,21 \text{ кг/см}^2$; тоді як для хорошої роботи підшипникових матеріалів необхідно щоб ця величина була не менше $0,6 \text{ кг/см}^2$.

Поліпшення механічних властивостей Pb-Sb сплавів може бути досягнуто за рахунок добавок Sn, який підвищує твердість, стійкість проти корозії і зчеплення зі сталеву поверхнею.

1.2.1.4 Свинцево-кальцієві бабіти

Ці бабіти належать до системи Pb-Ca-Na.

М'якою складовою бабіта є α -фаза (твердий розчин Na і Ca в Pb), а твердою складовою - кристали Pb_3Ca , Na і інші елементи які вводяться в сплав та підвищують твердість α розчину.

Бабіти олов'яні і свинцеві ГОСТ 1320-74 поставляються у виді чушок (злитків) різних розмірів (рис. 1.1).

Бабіт Б16 при кімнатній температурі - крихкий, при ударних навантаженнях в підшипниках він дає тріщини і кришиться. При спокійному навантаженні Б16 працює добре і може бути застосований при $PV \leq 60$.

Серед свинцево-кальцієвих бабітів найбільше поширення набули сплави марок БКА, БК2 і БК2Ш.

Кальцієві бабіти використовуються на залізничному транспорті - підшипники валів, коліс, колінчастих валів тепловозів.

Хімічний склад та фізико-механічні властивості бабітів повинні відповідати даним табл. 1.1 та табл. 1.2.

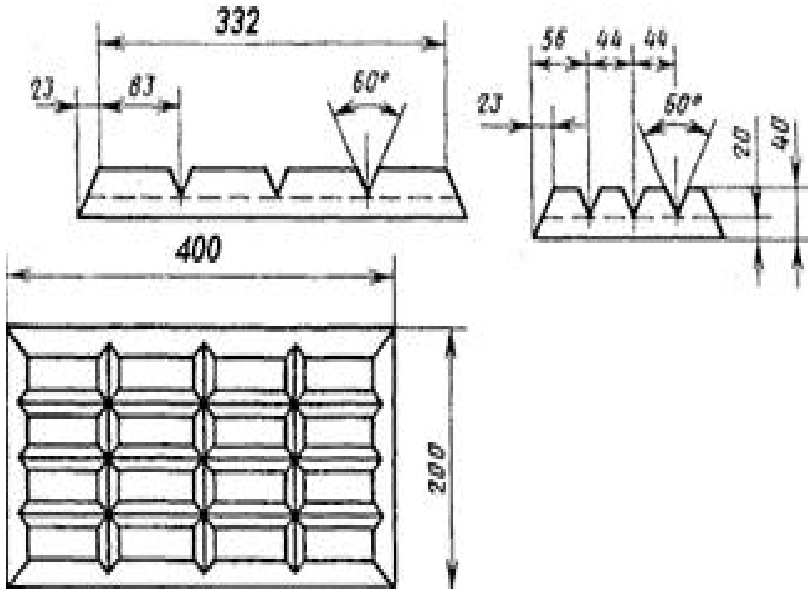


Рисунок 1.1 – Види злитків бабітів

Таблиця 1.1 – Хімічний склад бабітів

Марка	Хімічний склад, мас. част. %										
	Sn	Sb	Cu	Cd	Ni	As	Fe	Zn	Pb	Bi	Al
Б88	інше	7,3 - 7,8	2,5 - 3,5	0,8 - 1,2	0,15 - 0,25	0,05	0,05	0,005	0,1	0,05	0,005
Б83	інше	10,0 - 12,0	5,5 - 6,5	-	-	0,05	0,1	0,004	0,35	0,05	0,005
Б16	15,0 - 17,0	15,0 - 17,0	1,5 - 2,0	-	-	0,2	0,08	0,07	-	0,1	0,01
Б83С	інше	9,0 - 11,0	5,0 - 6,0	-	-	0,1	0,1	0,01	1,0 - 1,5	0,1	0,05
БН	9,0 - 11,0	13,0 - 15,0	1,5 - 2,0	0,1 - 0,7	0,1 - 0,5	0,5 - 0,9	0,1	0,02	-	0,1	0,05
БС6	5,5 - 6,5	5,5 - 6,5	0,1 - 0,3	-	-	0,05	0,1	0,01	0,05	0,07	0,005

Вибір бабітів визначається умовами роботи підшипників
табл. 1.3.

Таблиця 1.2 - Фізико-механічні властивості бабітів

Марка	Щільність, г/см ³	Твердість по Брінеллю НВ 5/62, 5/60, НВ 2, 5/15, 6/60 при 20 °С	Межа текучості при стисненні, кгс/мм ²	Межа міцності при стисненні, кгс/мм ²	Температура, С		
					початку розплавлення	плавлення	залівки
Б88	7,35	27-30	-	-	-	320	380-420
Б83	7,38	27-30	8-8,5	11-12	240	370	440-460
Б83С	7,4	27-30	-	-	230	400	440-460
БН	9,55	27-29	7-7,4	12,5-13	240	400	480-500
Б16	9,29	30	8,6	14,7	240	410	480-500
БС6	10,05	15-17	-	-	247	280	-

Таблиця 1.3 – Умови роботи підшипників

Марка	Характеристика навантаження	Питомий тиск, Р, кгс/см ²	Окружна швидкість V, м/с	Напруженість роботи Р·V, (кгс/м)/(см ²)	Робоча температура, С
Б88	спокійна ударна	200, 150	50	750	75
Б83	спокійна ударна	150 100	50	750 500	70
Б83С	спокійна ударна	150 500	50	750 500	70
Б16	спокійна	100	30	300	70
БН	спокійна ударна	100 76	30	300 200	70

Бабіти застосовуються тільки в підшипниках, що мають міцний сталевий, чавунний або бронзовий корпус (табл. 1.4). Сплав наноситься у виді шару товщиною 1...3 мм на робочу поверхню вкладиша підшипника ковзання.

З олов'янистих бронз найбільше застосування з Sn-Sb сплавів для заливки підшипників знайшли дві марки - Б88 і Б83.

Недоліками Б83 є невисокий опір втомі. Тому він не може бути застосований в підшипниках, що заливаються тонким шаром і піддаються вібраційним навантаженням. Товщина заливки $\delta > 3$ мм (підшипники ковзання валів, вкладиші тихохідних потужних судових двигунів, компресорів).

Б88 < 3 мм. Чим менше δ , тим вище втомна міцність.

Б88 застосовується при ударних навантаженнях на підшипник (гідротурбіни, шатуни і компресори).

Серед свинцево-сурм'янистих сплавів найбільшого поширення для заливки підшипників знайшли сплави марок Б16, БС6 і БН, які використовуються для машин середньої завантаженості.

Таблиця 1.4

БС6	Підшипники, що працюють при великих швидкостях і високих динамічних навантаженнях. Підшипники швидкохідних дизелів.
Б83, Б83С	Підшипники, що працюють при великих швидкостях і середніх навантаженнях. Підшипники турбін, дизелів, опорні підшипники гребних валів.
БН	Підшипники, що працюють при середніх швидкостях і навантаженнях. Підшипники компресорів і дизелів.
Б16	Підшипники обладнання важкого машинобудування
БС6	Підшипники автотракторних двигунів

1.2.1.5 Сплави на мідній основі

Антифрикційні сплави на мідній основі мають високу температуру плавлення і, в порівнянні з бабітом, механічні властивості, як при нормальній, так і при підвищених температурах.

Ці сплави поділяють на два класи:

- сплави міді з Sn або іншими металами, називаються бронзами. Найбільшого поширення, як антифрикційні, отримали олов'яністі, олов'янофосфористі, свинцюваті, крем'яністі, алюмінієві і берилієві бронзи.

- сплави Cu з Zn – називаються латунями.

Однак до теперішнього часу такий розподіл на класи, в якійсь мірі умовний. Деякі бронзи містять цинку не менше, ніж латуні.

1.2.1.6 Олов'яністі бронзи

Олов'яністими бронзами називаються сплави Cu з Sn, а також більш складні Cu-Sn сплави, що містять P, Pb, Zn та ін. елементи.

Сплави цієї групи характеризуються високою міцністю, хорошою пластичністю, значною пружністю і високим опором втомі і зносу.

Олов'яністі бронзи здатні витримувати великі ударні навантаження. Завдяки цьому вони досить широко застосовуються для підшипників, що працюють при великих навантаженнях на шийку вала і високих окружних швидкостях. У мідноолов'янистих сплавів у виробничих умовах структури відповідні рівномірній діаграмі стану не утворюються, тому для їх оцінки користуються так званою практичною діаграмою (рис. 1.2).

Олово утворює з Cu твердий розчин α максимальна розчинність Sn дорівнює 13,2 %.

Литі сплави, що містять більше 7% Sn, мають, крім основного твердого розчину α також виділення евтектоїда $\alpha + \delta$. Фаза δ дуже тверда, крихка і не кується в холодному стані. При нагріванні сплаву Cu-Sn вище 520° евтектоїд $\alpha + \delta$ (Cu_3Sn) перетворюється в твердий розчин β , який при підвищеній температурі має високу пластичність. Тому сплави Cu-Sn, що містять до 20-25 % Sn, легко куються і штампуються в гарячому стані і абсолютно не піддаються обробці тиском в холодному стані.

У практиці застосовують тільки сплави з вмістом до 10-12 % Sn.

Розрізняють олов'яністі бронзи **ливарні**, та **що деформуються**.

Бронзи, що деформуються виготовляють у виді прутка, стрічки, дроту в нагартованому (твердому) та відпаленому (м'якому)

стані. Структура деформованих олов'яних бронз - α -твѣрдий розчин.

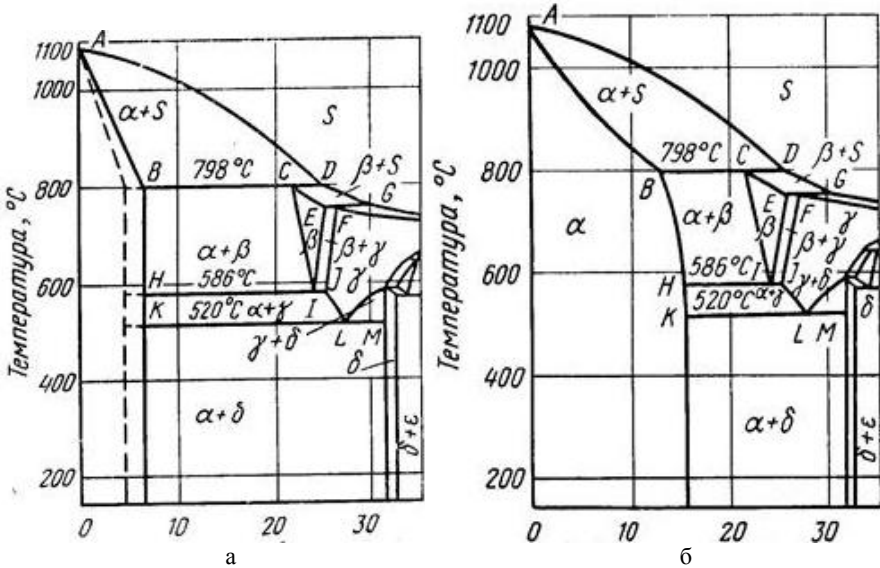


Рисунок 1.2 – Практична діаграма стану мідноолов'янистих сплавів (а) придатна для промислових умов їх обробки (б)

Ливарні бронзи, що містять велику кількість Zn, P і Pb, мають двофазну структуру: α -твѣрдий розчин і тверді, крихкі включення δ фази, що входять, зазвичай, в структуру евтектоїда.

Таблиця 1.5 - Властивості ливарних бронза та бронз, що деформуються

Показники	Бр.ОЦС 4-4-2,5	Бр.ОФ 6,5-0,4	Бр. ОЦС 4-4-17
Тп °С	965	995	965
Ударна в'язкість кгм/см ²	2,5	5,5	0,87
НВ	67	82	62
Коеф. лінійного розширення, 10 ⁻⁶ К ⁻¹	18,3	17,1	18
Коеф. тертя f			
з мастилом,	0,016	0,01	0,01
без змащення,	0,26	0,12	0,2
Теплопровідність	0,22	0,12	0,1
σ_v , кг/мм ²	28	33	19

Олов'яністі бронзи мають гарні ливарні властивості і

застосовуються для лиття деталей складної форми. Недоліком виливків з олов'янистих бронз є висока мікропористість.

До бронз, що деформуються, відносяться:

Бр. ОЦС 4-4-2,5 - 4% Sb, 4% Zn, 2,5% Pb інше Cu.

Тут слід згадати правила маркування сплавів на мідній основі

Марки позначаються наступним чином.

Перші букви марки означають: Л - латунь і Бр. - бронза.

Букви, що слідує за буквою Л в латуні або Бр. у бронзі, означають: А - алюміній, Б - берилій, Ж - залізо, К - кремній, Мц - марганець, Н - нікель, О - олово, С - свинець, Ц - цинк, Ф - фосфор.

Цифри, розташовані після літери, вказують середньо-процентний вміст елементів. Порядок розташування цифр, прийнятий для латуней, відрізняється від порядку, прийнятого для бронз.

У марках латуні перші дві цифри (після букви) вказують вміст основного компонента - міді. Інші цифри, відокремлюються один від одного через тире, вказують середній вміст легуючих елементів. Ці цифри розташовані в тому ж порядку, як і букви, що вказують присутність в сплаві того чи іншого елемента. Таким чином вміст цинку в найменуванні марки латуні не вказується і визначається по різниці.

Наприклад, Л86 означає латунь з 68 % Cu (в середньому) і не має інших легуючих елементів, крім цинку; його вміст визначається вирахуванням з 100 % суми відсотків і становить 32 %. ЛАЖ60-1-1 означає латунь з 60 % Cu, леговану алюмінієм (А) в кількості 1 % і залізом (Ж) у кількості 1 %, вміст цинку у середньому становить 38 %.

У марках бронзи (як і в сталях) вміст основного компонента - міді - не вказується, а визначається по різниці. Цифри після букв, відокремлюються один від одного через тире, вказують середній вміст легуючих елементів; цифри розташовані в тому ж порядку, як і букви, що вказують на легування бронзи тим чи іншим компонентом.

Наприклад, Бр.ОЦ10-2 означає бронзу з вмістом олова (О) ~ 4 % і цинку (Ц) ~ 3 %. Вміст міді визначається по різниці (з 100 %). Бр.АЖН10 -4-4 означає бронзу з 10 % Al, 4 % Fe і 4 % Ni (і 82 % Cu). Бр. КМц3-1 означає бронзу з 3 % Si, і 1 % Mn (і 96 % Cu). Її застосовують в автомобільній, тракторній і авіаційній промисловості у виді втулок, торцевих дисків. Стрічки з цієї бронзи можуть бути використані при ремонті суцільнолитих бронзових втулок, а зношена цільнолита втулка - як перехідна після розточення її на діаметр під

запресовку ремонтних втулок.

Бр.ОФ 6,5-0,4 - 6,5 % Sb; 0,4 % Р, ост. Cu

Застосовується для виготовлення деталей, що працюють при питомих навантаженнях до 100 кг/см^2 і окружних швидкостях до 3 м/с. Ці бронзи добре витримують ударні навантаження. Для того, щоб можна було застосовувати цю бронзу, нашийках вала треба мати велику твердість, центрування вала повинно бути точною, а мащення рясним.

До ливарних бронз відноситься бронза Бр.ОЦС 4-4-17 – 4 % Sb, 4 % Zn, 17 % Pb, решта Cu. Ця бронза застосовується для відливання плаваючих втулок.

1.2.1.7 Свинцоваті бронзи

Свинець практично не розчиняється в рідкій міді. Тому сплави після затвердіння складаються з кристалів Cu і включень Pb.

Добавки Pb зменшує міцність Cu, її пластичність і ударну в'язкість. Подвійні Cu-Pb сплави широко застосовують для заливки підшипників замість стандартних бабітів на основі Sn і Pb.

Для виготовлення ж цілих деталей Cu-Pb сплави не можуть замінити олов'янисті та інші бронзи, тому що вони мають порівняно низькі механічні властивості. Однак добавка до подвійних Cu-Pb сплавів таких металів, як Sn, Mn і As, підвищує механічну міцність, що дозволяє застосувати ці сплави і для заміни Sn бронз.

Таблиця 1.6 - Властивості Pb – бронз

Показник	Бр.ОС8-12	Бр.ОС5-25	Бр.С30
Температура плавлення, °С	950	940	975
НВ	61	57	28
ударна в'язкість, кг/см^2	1,2	2,3	0,78
α - коеф. лінійного розш. 10^{-6} K^{-1}	18	17,6	18,4
Коеф. тертя з мастилом f	0,007	0,005	0,009
Коеф. тертя без змащення f	0,13	0,14	0,165
$\sigma_B \text{ кг / мм}^2$	20,5	14,6	7,6

Бр. ОС8-12 (8% Sb, 12% Pb, решта Cu) - найбільш міцна в порівнянні з усіма Pb бронзами і тому застосовується в важких умовах

роботи, наприклад, в підшипниках станів холодної прокатки.

При підвищенні температури міцність бронзи змінюється стрибкоподібно. Це викликано розплавленням Pb, розташованого в структурі сплаву у виді окремих округлих включень.

Бронзи, що містять 25% Pb застосовують не тільки для заливки підшипників, а й для відливання цілих вкладишів і втулок. Для підвищення механічних властивостей сплавів застосовують легуючі елементи - Sn, Mn або As. Крім того, ці елементи зменшують ликвацію Pb, покращують розподіл Pb в сплаві. Найбільшого поширення набув сплав Бр. ОС. 5-25 (5 % Sn, 25 % Pb, 70 % Cu), який відрізняється від інших подібних сплавів більш високою межею міцності при розтягуванні, хорошими технологічними і антифрикційними властивостями. Бронза Бр. ОС 5-25 знайшла застосування для виготовлення підшипників, що працюють при високих питомих тисках, підшипників для прокатних станів, буксових підшипників тепловозів, мастилоущильнювальних кілець, втулок для верстатів. Характерним для Бр. ОС5-25 є різка зміна властивостей при $t_{пл}$ Pb. Тому таку бронзу не можна застосовувати в тих випадках, коли підшипник при експлуатації нагрівається до $t > 300^\circ \text{C}$, як наприклад, в підшипниках верстатів гарячої прокатки.

Свинцювата бронза Бр.С30 – 30 % Pb і 70 % Cu застосовуються для заливки підшипників потужних тракторних дизелів. Твердість Бр.С30 при кімнатній температурі така ж як у бабіту Б83, але з підвищенням температури падає повільніше, ніж у Б83. Теплопровідність Бр. С 30 в 5 разів вище, ніж у Б83, і це дозволяє застосовувати Бр. С 30 при роботі на підвищених обертах і великих питомих навантаженнях, коли при терті виділяється велика кількість тепла, яке повинно бути швидко видалено. Крім того, Бр.С 30 має високий опір втомі. При спокійному навантаженні Бр.С 30 добре витримує питомий тиск до 200 кг/см^2 при окружній швидкості до 10 м/с. При ударному навантаженні граничним є навантаження 150 кг/см^2 і окружна швидкість до 8 м/с. Основним недоліком Бр.С30 - є складність її виготовлення в порівнянні з Su-бабітом і складність технологічного процесу заливки. Крім того, зношування сталі при Бр.С30 більше, ніж при Б83, і тому доводиться застосовувати шийки валів з високою твердістю. Найкращою структурою БрС.30 є середньозерниста, при якій Pb розподілений в мідній основі у виді округлих крапель середньої величини. Бр.С30 наплавляють тонким

шаром на сталеві стрічки або труби. Такі біметалічні підшипники прості у виготовленні і легко замінюються при зношуванні.

1.2.1.8 Крем'янисті бронзи

При легуванні Cu кремнієм до 3,5% підвищується міцність, а також пластичність. Добавка в крем'янисту бронзу Ni і Mn покращує механічні та корозійні властивості.

Ці бронзи легко обробляються тиском, різанням і зварюються.

Найбільшого поширення набули Si бронзи, що містять Mn, такі як Бр. КМЦ 3-1. Вона містить 3 % Si, 1 % Mn, решта - Cu.

Бр. КМЦ 3-1 має високу корозійну стійкість в атмосфері, в розчинах органічних і мінеральних солей і кислот, в морській воді, а також дуже стійка до дії їдкого натру і хлористих сполук.

Завдяки високим антифрикційним властивостям Бр. КМЦ 3-1 широко застосовується в моторобудуванні і машинобудуванні для виготовлення втулок та інших деталей, що труться.

1.2.1.9 Берилієві бронзи

З групи безолов'янистих бронз, берилієва бронза є найбільш високоякісною. Вона має високу міцність, твердість, опір втомі, корозійну стійкість і добрі антифрикційні властивості.

Фізичні властивості цих бронз можуть бути поліпшені термічною обробкою. Берилієві бронзи добре обробляються в холодному і гарячому стані, особливо після нагартування. Можуть зварюватись.

Для підвищення механічних властивостей берилієві бронзи після нагартування піддають старінню при $T = 300-350^{\circ} \text{C}$. При цьому з пересиченого α -розчину виділяються дисперсні частки (CuBe), які істотно підвищують міцність бронзи. Якщо провести попередній наклеп, то бронза при старінні зміцнюється сильніше і швидше.

У промисловості застосовуються 2 марки берилієвої бронзи Бр.Б2 і Бр.Б2,5. Вони є заміниками олов'янистих бронз при

виготовленні пружних контактних деталей, кулачків, а також для виготовлення різноманітних втулок, підшипників, шестерень, що працюють при великих швидкостях, підвищеному тиску і температурі.

1.2.1.10 Алюмінієві бронзи

Алюмінієві бронзи - добре протистоять корозії в морській воді і вологій атмосфері, мають високі механічні і технологічні властивості. Ці сплави можна легко кувати і прокатувати в гарячому і холодному стані, а також регулювати їх механічні властивості, додаючи різні легуючі компоненти. Все це дозволяє застосовувати Al-бронзи у важко навантажених вузлах тертя (дорожні машини, важке верстатне обладнання).

Найбільш часто застосовують Al-бронзи подвійні (Cu-Al) і додатково леговані Ni, Mn і Fe.

Сплави, що містять до 9 % Al, однофазні та складаються тільки з α -твердого розчину Al в Cu. При вмісті Al більше 9 % в структурі з'являється евтектоїд $\alpha + \gamma$, (γ - електронне з'єднання (Cu₃₂Al₁₉)). Фаза α пластична, але міцність її не велика.

Двофазні сплави $\alpha + \gamma$ мають підвищену міцність, але пластичність їх помітно нижче.

Fe подрібнює зерно і підвищує механічні та антифрикційні властивості Al бронз.

Ni покращує механічні властивості і зносостійкість, як при низьких, так і при високих температурах (500-600 °C).

Однофазні Al бронзи мають високу пластичність, їх застосовують для глибокого штампування. Двофазні бронзи піддають гарячій деформації або фасонному литтю.

Ливарні властивості Al бронз нижче, ніж Sn бронз, але вони забезпечують високу щільність виливків.

Бр.АЖ9-4- 9% Al, 4% Fe, решта Cu. Ця бронза поряд з високою міцністю має високі антифрикційні властивостями і тому застосовується як замітник Sn бронз марок Бр.ОФ10-1 і Бр.ОЦ6-6-3 для виготовлення деталей, що працюють з великими і ударними навантаженнями (черв'ячні колеса, шестерні, клапани, сидла клапанів, вкладиші підшипників). Бр.АЖ9-4 може працювати при питомих

навантаженнях P до 300 кг/см^2 і при окружних швидкостях до 10 м/с , при цьому $P \cdot U \leq 600$.

Бр.АЖМц10-3-1,5 – 10 % Al; 3 % Fe; 1,5 % Mn; решта Cu. Має високі механічні властивості, які підвищуються після наклепу. Має високі антифрикційні властивості. Її знос зі змащенням майже такий же, як у дрібних бабітів. Знос без змащення не великий і вона не «намазується» на шийку вала. Застосовується для виготовлення підшипників, шестерень, втулок.

Таблиця 1.7 - Властивості Al-бронз

Показники	Бр.АЖ9-4	Бр.АЖМц10-3-1,5	Бр.АЖН10-4-4
$T_{пл}, ^\circ\text{C}$	1040	1062	1082
НВ	144	130	190
Ударна в'язкість, кгм/см^2	6,3	6,3	3,2
Коеф. ліній. розш. 10^{-6}K^{-1}	18,1	16	17,1
Коеф. тертя з мастилом, f	0,004	0,012	0,011
Коеф. тертя без змащення, f	0,18	0,25	0,23
$\sigma_B, \text{кг / мм}^2$	55	60	65

Бр.АЖН10-4-4 – 10 % Al; 4 % Fe; 4 % Ni; решта Cu. Застосовують для виготовлення відповідальних деталей (шестерні, сідла клапанів, що направляють втулки випускних клапанів авіаmotorів).

Підшипники з бронзи існують в монометалічному і біметалічному виконанні.

Монометалічні підшипники (вкладиші, втулки) виготовляють литтям з наступною механічною обробкою. При ремонті машин такі деталі замінюють новими, як тільки зазори в підшипнику перевищать встановлену величину, старі деталі використовують як лом для переплавки.

Величина зносу деталі невелика, тому економічно доцільно виготовляти їх біметалевими - зі сталеву основу і, порівняно тонким (0,5...1,5 мм), робочим шаром бронзи. При цьому скорочується витрата дефіцитних дорогих кольорових металів і, крім того, виконується принцип «доповнення якості» - високі антифрикційні властивості робочого шару доповнюють міцністю сталевий підшипник, що створює більш сприятливі умови для його

роботи.

Виготовляти біметалеві деталі можна наступними методами:

— заливка бронзи на сталеву або чавунну деталь в стаціонарних формах із застосуванням відновлювальної атмосфери;

— заливка бронзи в стаціонарних формах із застосуванням флюсів, що оберігають поверхню деталі, яка заливається, від окислення;

— заливка методом занурення сталевої заготовки на розплавлену бронзу;

— відцентрова заливка бронзою на сталь із застосуванням відновлювальної атмосфери або флюсів;

— плазмовим напиленням бронзи на сталеву заготовку.

1.2.1.11 Латуні

Латуні - це подвійні або багатокомпонентні сплави на основі Cu, в яких основним легуючим елементом є Zn.

Cu-Zn сплав із вмістом до 39 % Zn утворює однофазну структуру (α - твердий розчин) з кристалічною решіткою ГЦК.

Сплави із вмістом 39-46 % Zn утворюють два твердих розчина $\alpha + \beta$. β -фаза – упорядкований твердий розчин на базі електронного з'єднання CuZn із ґраткою ОЦК.

Зміна структури сплаву впливає на механічні і фізичні властивості.

Однофазні латуні, що містять до 39 % Zn, вельми пластичні і добре обробляються тиском в гарячому і холодному стані. Ці сплави в залежності від вмісту Zn мають структуру $\alpha + \beta$ або β .

Технологічні властивості (прокатка, пресування, штампування, кування, волочіння) латуні значно вищі за ті ж властивості Sn-бронз.

Добавка до подвійних Cu-Zn сплавів деяких елементів підвищує механічні властивості і корозійну стійкість. Такі латуні називають спеціальними.

При добавці Sn, Ni і Mn значно підвищуються міцність і корозійностійкість латуней, а при доданні Al з Ni, Fe і Mn сильно підвищується твердість, міцність і корозійностійкість.

Добавка Pb підвищує ливарні властивості латуней, полегшується різання і поліпшуються антифрикційні властивості.

1.2.1.12 Олов'янисті латуні

При додавці до однофазної латуні олова в межах 1.0-1.5% не погіршуються механічні властивості і оброблюваність їх в гарячому і холодному стані, а також поліпшуються антикорозійні та антифрикційні властивості.

При додаванні такої ж кількості Sn до двофазних латуней їх пластичність зменшується, внаслідок чого прокатка і інші види обробки тиском затруднюються. Це пов'язано з появою багатою оловом крихкої фази.

Як антифрикційний сплав застосовується тільки олов'яниста латунь ЛО90-1 (олов'янистий томпак) для виготовлення суцільнотягнутих втулок, які знаходять призначення в автомобільній і тракторній промисловості.

ЛО90-1 містить 90 % Cu, близько 1 % Sn, решта Zn.

1.2.1.13 Свинцюваті латуні

Pb полегшує механічну обробку латуні різанням і покращує антифрикційні властивості при вмісті в межах 0,5-3 % Pb.

Такі латуні застосовуються для виготовлення деталей годинників.

ЛС59-1 містить 59 % Cu, 1 % Pb, решта - Zn.

1.2.1.14 Алюмінієві латуні

Al латуні використовуються в якості заміників олов'янистих бронз і застосовуються для виготовлення корозійностійких деталей в суднобудуванні, масивних черв'ячних гвинтів, запірної арматури,

втулок і підшипників.

ЛАЖ60-1-1-містить 60 % Cu, 1% Al, 1 % Fe, решта Zn.

1.2.1.15 Марганцевисті латуні

Такі латуні з вмістом Cu менше 57 % застосовуються для відливання антифрикційних деталей, арматури, а також втулок різного технологічного устаткування, які, зазвичай, виготовляють з олов'янистих бронз марок Бр.ОЦ-10-2, Бр.ОЦС-6-6-3, Бр.ОЦС-5-5-5, Бр.ОФ-6,5-0,25.

ЛМцЖ52-4-1 містить 52 % Cu, 4 % Mn, 1 % Fe, решта Zn.

1.2.1.16 Марганцево-свинцеві латуні

Є заміниками олов'янистих бронз марок Бр.ОЦС6-6-3, Бр.ОЦС5-5-5, Бр.ОФ10-1 і алюмінієвої бронзи марки Бр.АЖ9-4.

Латунь марки ЛМцС58-2-2 – 58 % Cu, 2 % Mn, 2 % Pb, решта Zn - застосовується для відливання втулок, армування вагонних підшипників, а також для пресування труб, що йдуть на виготовлення втулок.

Таблиця 1.8 - Порівняльні характеристики латуні

Показник	ЛО9 0-1	ЛС59 -1	ЛАЖ6 0-1-1	ЛМцС 58-2-2	ЛМцЖ 52-4-1	ЛКС8 0-3-3
$T_{пл}, ^\circ C$	1015	885		918	967	909
НВ	51	71	90	95	120	93
Ударна в'язкість, кгм/см ²	7,5	5,0		7	5,2	4
α коеф. лінійн. розш. $10^{-6}K^{-1}$	18,4	20,9		20,6	22,7	17
μ з мастилом	0,013	0,014		0,007	0,05	0,009
μ без змащення	0,46	0,16		0,14	0,32	0,15
$\sigma_{вз}, кг / мм^2$	20,7	29,0	42	34	50	40

1.2.1.17 Крем'янисті латуні

Застосовуються в якості заміників олов'янистих бронз марок Бр.ОЦС5-5-5, Бр.ОЦС6-6-3, алюмінієвої бронзи марки Бр.АЖС7-1,5-1,5.

Латунь ЛКС80-3-3 застосовують для виготовлення литих підшипників і втулок.

1.2.1.18 Цинкові сплави

Ці сплави здавна використовуються як антифрикційні матеріали, хоча і не отримали достатньо широкого поширення, в той же час мають ряд цінних властивостей, які дозволяють використовувати їх як замітники олов'янистих бронз і свинцевоолов'янистих бабітів.

Найбільшого поширення в промисловості отримали потрійні сплави Zn з Al та Cu.

Таблиця 1.9 - Порівняльні характеристики цинкових сплавів

Показник	ЦАМ10-5	ЦАМ9-1.5
$T_{пл}, ^\circ C$	395	382
НВ	104	84
Ударна в'язкість, $кгм/см^2$	0.6	11.77
коеф. лінійн. розш. $10^{-6} K^{-1}$	27	24
μ з мастилом	0.009	0.012
μ без змащення	0.35	0.4
σ_b $кг / мм^2$	30	30

Ряд промислових підприємств на основі цинку випускає сплави згідно ГОСТ 25140-93.

Zn з Al та Cu утворює обмежений твердий розчин. Так, при $20^\circ C$ у Zn розчиняється 0,2 % Al і 0,8 % Cu.

Таблиця 1.10 - Властивості та галузь застосування цинкових сплавів

Марка	Характерні властивості	Галузь застосування
ZnAl14A	Рідкоплинність, підвищена корозійна стійкість, стабільність розмірів	В автомобільній, тракторній, електротехнічній та інших галузях промисловості для відливання деталей приладів, які потребують стабільність розмірів
ЦА4о	Рідкоплинність, корозійна стійкість, стабільність розмірів	
ЦА4	Як для марки ЦА4о, але з меншою корозійною стійкістю	
ZnAl14Cu1A	Рідкоплинність, підвищена корозійна стійкість, практично незмінність розмірів при природному старінні	В автомобільній, тракторній, електротехнічній та інших галузях промисловості для відливання корпусних, арматурних, декоративних деталей, що не вимагають підвищеної точності
ЦА4М1о		
ЦА4М1	Як для марки ЦА4М1о, але з меншою стійкістю розмірів	
ЦА4М1в	За технологічними та експлуатаційними властивостями поступається попереднім маркам сплавів цієї групи	У різних галузях промисловості для лиття невідповідальних деталей
ZnAl4Cu3A	Рідкоплинність, висока міцність, корозійна стійкість, змінність розмірів до 0,5 %	В автомобільній та інших галузях промисловості для виготовлення деталей, що потребують підвищеної точності
ЦА4М3о		
ЦА4М3	Як для марки ЦА4М3о, але зі зниженою корозійною стійкістю	

ЦА8М1	Призначені для заміни стандартного антифрикційного сплаву	Вкладиші підшипників, втулки підвіски, що балансує, черв'ячні шестерні, сепаратори підшипників кочення
ЦА30М5	ЦАМ10-5, значно перевершують його за механічними властивостями і зносостійкості	

Добавка Al підвищує міцність і твердість сплавів, ударна в'язкість сплавів практично не змінюється. Al зменшує знос сплаву і перешкоджає налипанню сплаву на шийку вала при сухому терті.

Cu підвищує антифрикційні і ливарні властивості сплавів.

Для підвищення корозійної стійкості та міцності сплаву, в нього додають невелику кількість Mg. Крім того, Mg зменшує здатність сплаву розм'якшуватися при підвищених температурах.

Найбільший інтерес серед відомих Zn-сплавів являє сплав марки ЦАМ10-5, що містить 10 % Al, 5% Cu, 0,05 % Mg, інше Zn. В литому виді, цей сплав застосовують для монометалевих вкладишів і втулок залізничного транспорту і для відливання біметалевих виробів зі сталевим корпусом. В деформованому виді сплав ЦАМ10-5 використовують для отримання біметалевих смуг зі сталлю і Al сплавами методом прокату і подальшим штампуванням вкладиша. Цей сплав може замінювати олов'янисті бронзи для вузлів тертя, температура яких не перевищує 100° С. При більш високій температурі сплав розм'якшується і налипає на вал.

У промисловості також знайшов застосування сплав ЦАМ9-1.5 – 9 % Al, 1,5 % Cu, 0,05 % Mg інше Zn. Цей сплав відрізняється від сплаву ЦАМ10-5 більшою пластичністю.

1.2.1.19 Алюмінієві сплави

Сплави на алюмінієвій основі до 50-60 р.р. минулого століття не знаходили широкого застосування внаслідок того, що вони мають високий коефіцієнт лінійного розширення (в двічі більше, ніж у сталі),

вимагають більшого зазору і не схоплюються при заливці зі сталеву основою. У той же час Al сплави мають малу питому вагу, здатні виносити високі питомі тиски (до 500 кг/см^2 при окружній швидкості до 10 м/с), мають високі антифрикційні властивості, теплопровідність Al сплавів вище теплопровідності антифрикційних сплавів на Sn, Pb, Zn, Cd і Fe основах.

Основними компонентами сплавів є Sn, Cu, Ni, Si, які утворюють з Al гетерогенну структуру.

1.2.1.20 Сплави Al-Cu

Розчинність міді в алюмінії при 20°C дуже незначна і становить $0,3\%$. Мідь не входить в твердий розчин, утворює з алюмінієм хімічну сполуку Al_2Cu , яка розташовується по межах зерен алюмінію.

Найбільше застосування з Al-Cu сплавів мають сплави, що містять Cu 4% (дюралюмін) і 8% (алькусін). З дюралюмінів для застосування в якості підшипникового матеріалу використовують сплав Д1 - містить 4% Cu, $0,5\%$ Mg, $0,5\%$ Mn, 95% Al і Д16 – 4% Cu, $1,5\%$ Mg, $0,5\%$ Mn, 94% Al. Алькусін марки АМК-2 – 8% Cu, 2% Si, $1,5\%$ Fe, $0,5\%$ Mg, $0,5\%$ Mn, $0,5\%$ Zn, 87% Al.

Таблиця 1.11 - Порівняльні характеристики Al-Cu сплавів

Показник	Д 1	АМК-2
$T_{\text{пл}}, ^\circ \text{C}$	645	658
$A, \text{ кг / см}^2$	1,5	0,34
Ударна в'язкість, кгм/см^2	0,5	0,5
$\alpha * 10^6$	22,6	25,7
μ з мастилом	0,013	0,005
μ без змащення	0,28	0,2
$\sigma_{\text{в}}, \text{ кг / мм}^2$	25	16
НВ	50	70

Д16 має більш високу міцність, ніж Д1, близьку до олов'янистих бронз. Дюралюмін легко піддається обробці, з нього отримують напівфабрикати у виді прокатних стрічок і смуг, з яких виготовляють втулки електролебідок, блоків, листозгинальних вальців. В якості мастила рекомендується солідол. Дюралюмін застосовується в парі з

твердими валами.

Алькусін може бути застосований у верстатобудуванні для заміни підшипників з олов'янистих бронз, що працюють при питомих тисках до 20 кг/см^2 та швидкостях до 3 м/с. У зв'язку з тим, що приробіток алькусіна до шийки вала дуже важкий, необхідна ретельна обробка робочої поверхні вкладиша. Крім того, зазор між шийкою вала і підшипником повинен бути більше, ніж при застосуванні бабіту.

1.2.1.21 Чавуни

Чавун антифрикційний, призначений для виготовлення виливків, що працюють у вузлах тертя з мастилом, виготовляють згідно з ГОСТ 1585-85 (табл. 1.12).

Призначення антифрикційних чавунів

АЧС-1, АЧС-2, АЧС-4, АЧК-1- для роботи в парі із загартованим або нормалізованим валом.

АЧС-3 Для роботи в парі із загартованим або нормалізованим валом або валом, що не піддається термічній обробці.

АЧС-5 Для роботи в особливо навантажених вузлах тертя в парі із загартованим або нормалізованим валом.

АЧС-6 Для роботи у вузлах тертя при температурі до 300°C в парі з валом, що не піддається термічній обробці.

АЧВ-1 Для роботи у вузлах тертя з підвищеними окружними швидкостями в парі із загартованим або нормалізованим валом.

АЧВ-2 Для роботи в умовах тертя з підвищеними окружними швидкостями в парі з валом, що не піддається термічній обробці.

АЧК-2 Для роботи в парі з валом, що не піддається термічній обробці.

Таблиця 1.12 - Хімічний склад марок чавуну антифрикційного (ГОСТ 1585-85)

Марка чавуну	Масова частка елемента, %												
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Cu	Sb	Pb	Al	Mg	P	S
АЧС -1	3,2 - 3,6	1,3 - 2,0	0,6 - 1,2	0,2 - 0,5	-	-	0,8 - 1,6	-	-	-	-	0,15 - 0,40	≤0,12
АЧС -2	3,0 - 3,8	1,4 - 2,2	0,3 - 1,0	0,2 - 0,5	0,2 - 0,5	0,03 - 0,10	0,2 - 0,5	-	-	-	-	0,15 - 0,40	≤0,12
АЧС-3	3,2 - 3,8	1,7 - 2,6	0,3 - 0,7	≤0,3	≤0,3	0,03 - 0,10	0,2 - 0,5	-	-	-	-	0,15 - 0,40	≤0,12
АЧС-4	3,0 - 3,5	1,4 - 2,2	0,4 - 0,8	-	-	-	-	0,04 - 0,40	-	-	-	≤ 0,3	0,12 - 0,20
АЧС-5	3,5 - 4,3	2,5 - 3,5	7,5 - 12,5	-	-	-	-	-	-	0,4 - 0,8	-	≤0,2	≤0,05
АЧС-6	2,2 - 2,8	3,0 - 4,0	0,2 - 0,6	-	-	-	-	-	0,5 - 1,0	-	-	0,5 - 1,0	≤0,12
АЧВ-1	2,8 - 3,5	1,8 - 2,7	0,6 - 1,2	-	-	-	≤0,7	-	-	-	0,03 - 0,08	≤0,2	≤0,03
АЧВ-2	2,8 - 3,5	2,2 - 2,7	0,4 - 0,8	-	-	-	-	-	-	-	0,03 - 0,08	≤0,2	≤ 0,03
АЧК-1	2,3 - 3,0	0,5 - 1,0	0,6 - 1,2	-	-	-	1,0 - 1,5	-	-	-	-	≤ 0,2	≤0,12
АЧК-2	2,6 - 3,0	0,8 - 1,3	0,2 - 0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	≤ 0,2	≤0,12

* В позначенні марки: АЧ - антифрикційний чавун:

С - сірий з пластинчастим графітом;

В - високоміцний з кулястим графітом;

К - ковкий з компактним графітом; цифра - порядковий номер марки.

1.2.2 Неметалеві матеріали

1.2.2.1 Полімерні матеріали

Ці матеріали широко застосовуються у вузлах тертя сучасних машин і механізмів. Застосування пластмас в ряді випадків дозволяє збільшити надійність і ресурс машин, поліпшити їх експлуатаційні, техніко-економічні характеристики і технологічність, відмовитися від дефіцитних сплавів кольорових металів і знизити вартість машин.

Пластмаси поділяються на **термопластичні і термореактивні**.

До термопластичних відносяться пластмаси з лінійною або розгалуженою структурою полімерів, властивості яких можна змінити при багаторазовому нагріванні і охолодженні.

До термореактивних пластмас відносяться полімери, в яких при термічному впливі виникають реакції хімічного зв'язування ланцюгових молекул один з одним з утворенням сітчастої будови. Такі пластмаси не можуть переходити в пластичний стан при підвищенні температури без порушення просторових зв'язків в структурі полімеру.

Полімери (термопластичні і термореактивні) можуть використовуватися в якості антифрикційних матеріалів як в чистому виді, так і у виді композиційних матеріалів з різними наповнювачами. З полімерних матеріалів виготовляють зубчасті колеса, шківни, що труться, елементи підшипників ковзання, кулачкових механізмів, напрямних, ущільнень, сепаратори шарикопідшипників, втулки шарнірів і т.і.

Антифрикційні матеріали на основі термопластів мають високу технологічність, низьку собівартість, хороші демпфуючі властивості. Деталі з термопластів виготовляють високопродуктивними методами: литтям під тиском і екструзією; великогабаритні деталі - відцентровим литтям, ротаційним формуванням, аніонною полімеризацією мономера безпосередньо в формі, нанесенням антифрикційних покриттів з розплавів, порошків, дисперсій.

Термореактивні полімери обробляються переважно методами компресійного і ливарного пресування, вони міцніші і термостійкі. Порошкоподібні термореактивні композиції наносять на поверхні деталей, що труться у виді тонких покриттів.

Як антифрикційні термопластичні матеріали найбільш широко

використовують **поліаміди** (капрон, П68, П6, П12 і ін.), які мають низький коефіцієнт тертя і високу зносостійкість і працюють при температурі від - 40 до + 80° С. До недоліків поліамідів слід віднести їх відносно високе водо- та мастилопоглинання. Деталям з поліамідів властива висока опірність впливу циклічних навантажень, можливість роботи без мастила в парі із загартованою сталлю. Коефіцієнт тертя поліамідів по сталі без мастила дорівнює 0,1-0,2, з мастилом - в межах 0,05-0,10.

Для підвищення механічних властивостей поліаміди армують волокнистими та іншими матеріалами, а для поліпшення антифрикційних властивостей в них вводять різні тверді мастильні графітоподібні компоненти. В якості останніх застосовують графіт, дисульфід молібдену, тальк, термоантрацит, а в якості армуючого наповнювача – мілко рублене скловолокно або подрібнене вуглецеве волокно.

Температурний коефіцієнт лінійного розширення і водопоглинання наповнених поліамідів в 1,5-4,0 рази менше, коефіцієнт тертя без змащення в 1,2-2,0 рази більше, а інтенсивність зношування в 2-5 разів нижче, ніж у ненаповнених поліамідів. Їх застосовують в якості тонкошарового покриття металевих деталей.

Ароматичні поліаміди застосовуються для виготовлення деталей вузлів тертя як в чистому виді, так і у виді композиційних матеріалів, наповнених фторопластом, графітом, дисульфідом молібдену і іншими твердими мастильними матеріалами. Деталі з ароматичних поліамідів відрізняються високою міцністю і теплостійкістю, їх отримують методами компресійного і ливарного пресування.

Ароматичний поліамід **фенилон**, що випускається промисловістю, стійкий проти багатьох хімічних речовин, мастил, бензину. Деталі з фенилону можна експлуатувати при температурах від - 50 до + 200° С. Наповнення фенилону твердими мастильними матеріалами значно покращує його триботехнічні властивості. Фенилон використовують для виготовлення підшипників ковзання, підп'ятників, ущільнень, зубчастих коліс, сепараторів шарикопідшипників, деталей клапанів, кулачків і т.і.

У приладо- і машинобудуванні для виготовлення деталей вузлів тертя широко використовують фторопласти (табл. 1.13) і композиційні матеріали на основі фторопластів.

Таблиця 1.13- Характеристики матеріалів на основі фторопласта

Марка матеріалу	Склад, %	Густина ρ , кг / м ³	Міцність σ_b , МПа	Твердість НВ, кг / мм ²	Теплопровідність, C_p , Вт/(м·к)	Коефіцієнт тертя, f	Інтенсивність зношування, $J_n \cdot 10^9$
Ф-4		2,18÷2,21	14,0÷35,0	30÷40	0,2	0,04	80÷100
Ф4К20	Ф-4, 80 Кокс, 2					0,06	0,75÷1,0
Ф4М15	Ф-4, 85 МоS ₂ , 15	2,25	13,5	50	-	0,07	0,5 ÷ 1,8
Ф 4С15	Ф-4, 85 Скло-волокно рубл. 15	2,20	11-14	50 ÷ 60	-	0,08÷0,09	1,7 ÷ 2,0
Ф4К15М5	Ф-4, 80 Кокс, 15 МоS ₂ , 5	2,19	14	40	-	0,08÷0,09	1,7 ÷ 2,0
АМП-15М	Ф-4, Ситал, МоS ₂ Ф-4, нікель,	2,25	10 ÷ 14	46 ÷ 80	0,35	0,1 ÷ 0,12	1,8 ÷ 2,1
ФН-202	Нітрид бору, МоS ₂ Ф-4, 82	2,40	11 ÷ 18	40 ÷ 70	0,30	0,12÷0,15	28 ÷ 32
КРІОЛОН-3	Вуглецеве волокно, 5 МоS ₂ , 3	2,21	22 ÷ 25	55 ÷ 60	0,36	0,08 ÷ 0,1	0,5 ÷ 0,7
КВН-3	Ф-4, бронза, РbO, кокс, МоS ₂						

Вони відрізняються високою хімічною стійкістю (практично не діють кислоти, окислювачі, луги, розчинники), температуростійкістю (до 300 °С), а також зберігають працездатність при охолодженні до -250 °С. При температурі вище 350° С фторопласти реагують з деякими металами і оксидами. Коефіцієнт тертя фторопластів, особливо фторопласта-4 (0,03-0,05), знаходиться на рівні значень коефіцієнта тертя металевих пар в гідродинамічному режимі ковзання.

Застосування фторопластів у чистому виді, без наповнювачів, вельми обмежено, внаслідок низької міцності і зносостійкості. У машинобудуванні використовуються в основному композиційні матеріали. Введення різних наповнювачів (кокс, графіт, дисульфід молібдену, металеві порошки, скловолокно, вуглецеве волокно) в кількості 15-45 % по масі дозволяє значно підвищити міцність і зносостійкість (в 10-100 разів і більше). Використання фторопластів у виді лаків, паст, суспензій для виготовлення антифрикційних наповнювачів для різних композиційних матеріалів на основі термопластичних і термореактивних полімерів значно знижує коефіцієнт тертя і інтенсивність зношування багатьох вузлів тертя.

Високу хімічну стійкість і низьке водопоглинання має полімер **пентапласт**. Його застосовують для виготовлення деталей вузлів тертя підвищеної точності (шестерень, манжет і кілець ущільнювачів і т.д.). Ці деталі можна довго експлуатувати при температурі 120-130 °С, короткочасно - при 135-150 °С. Пентапласт переробляють всіма методами на обладнанні, що застосовується для термопластів. Коефіцієнт тертя при тиску 5 МПа (температура 20 °С) для пари тертя пентапласт-пентапласт становить 0,13-0,15; для пари пентапласт-загартована сталь - 0,11-0,13. Для підвищення механічних властивостей в пентапласт вводять мінеральні наповнювачі: графіт, смола, скловолокно, окис хрому і ін.

Поліформальдегідні смоли - термореактивні полімерні матеріали, що застосовуються для виготовлення деталей вузлів тертя в машинобудуванні (шестерні, втулки, муфти зчеплення, підшипники, сепаратори та ін.). Ці матеріали мають високу стійкість по відношенню до органічних розчинників, дії гарячої води, розчинів солей і органічних кислот, морської води, лугів; високі жорсткість, зносостійкість і стійкість до старіння, стабільність розмірів. Їх можна експлуатувати при температурі до 120 °С. Коефіцієнт тертя чистого поліформальдегіда по сталі без мастила - 0,30-0,35. Для підвищення

зносостійкості і поліпшення антифрикційних властивостей поліформальдегід наповнюють скловолокном, фторопластом, дисульфідом молібдену, вуглецевим волокном, коксом, сажею, графітом. Введення в сополімер поліформальдегіда 15-20 % фторопласта знижує коефіцієнт тертя в 1,5-2 рази, інтенсивність зношування - в 3-4 рази.

Матеріали на основі поліамідів.

Поліамід - це теплостійкий терморезистивний полімер, що застосовується в якості сполучного при виготовленні композиційних антифрикційних матеріалів. Вироби з таких матеріалів отримують в основному гарячим пресуванням з наступним спіканням. Ці матеріали мають високі радіаційну, хімічну, термічну і термоокислювальну стійкість, триботехнічні властивості, опір повзучості, особливо при високих температурах; малу летючість, усадку (0,7-1,0 %) при пресуванні і спіканні та водопоглинанням (0,2-0,3 %) (табл. 1.14). Вони можуть тривалий час експлуатуватися при температурі 220-260° С. і починають розкладатися на повітрі тільки при температурі 350 - 450° С, а в вакуумі або інертному середовищі - при 500 °С. Наприклад, поліамід ПМ-69 зберігає 90 % міцності при вигині після 500 год. роботи при 250° С і після 100 год. при 300° С.

Для виготовлення пористих виробів, наприклад підшипників, до поліамідів додають поліформальдегід. Для роботи в області криогенних температур застосовують поліаміди, наповнені бронзою.

Коефіцієнт тертя самозмащувальних композиційних матеріалів на основі поліамідів (табл. 1.15) зі збільшенням швидкості ковзання знижується. Фірма "Баден" (США) розробила самозмащувальні шарикопідшипники, працездатні в інтервалі температур від -50 до +260 °С при частоті обертання до 800 с⁻¹. Сепаратор цих підшипників виготовляють з пористих поліамідних матеріалів SP-8 і SP-811.

Поліаміди є перспективними для застосування у вузлах тертя, що працюють в вакуумі; для виготовлення деталей високої точності.

Для підвищення антифрикційних властивостей поліаміди армують і наповнюють твердими мастильними матеріалами. На основі поліамідів випускають композити, наповнені дисульфідом молібдену і графітом. В останні роки розроблені матеріали наповнені вуглецевим волокном.

Таблиця 1.14 - Характеристики матеріалів на основі полііміду

Марка матеріалу	Склад	Густина, ρ , кг/м ³	Міцність σ_b , МПа	Питома в'язкість КС, кДж/м ³	Твердість НВ, кг/мм ²	Гранична робоча температура, °С
ПА 6-1-203	ПА, графіт	1,15	60 ÷ 72	18 ÷ 50	130	-60 ÷ 165
ЛАМ-1	ПА, графіт, алюмінієва пудра	1,18	53	20	200	-60 ÷ 165
ПА12-11-13	ПА, MoS ₂	1,03	49	3-7	85	-60 ÷ 165
ПА66ПЕ	ПА, поліетилен	1,13	70	4	110	- 40 ÷ 80
ПА610-1-103	ПА, графіт	1,12	55	50 ÷ 80	-	до 120
ПА610-1	ПА, скловолокно, MoS ₂	1,35	125	20 ÷ 50	-	до 120
САМ-3	ПА, добавки	1,30	55	40 ÷ 50	130	до 100
САМ-5	ПА, графіт, добавки	1,16	47	35 ÷ 51	95	до 100
ПНС610-Т10	ПА, тальк	1,16	50 ÷ 60	50 ÷ 80	-	до 120
Масляний КСПЕ	ПА, скловолокно, поліетилен, мідь	-	-	30	80	-50 ÷ 200

Таблиця 1.15 - Характеристики самозмащувальних матеріалів на основі полііміда

Марка матеріалу	Склад матеріалу	Щільність ρ , г / см ³	Міцність, σ_b , МПа	Ударна в'язкість КС, кДж / м ²	Твердість НВ, кг / мм ²	Гранична робоча температура, °С
Поліар-2	ПМ-67, MoS ₂	1,3	-	50	140	-196 ÷ 300
Тесан-38	ПМ-69, MoS ₂	1,3	-	30	140	-196 ÷ 250
ПМ-67-ДІ-3	ПМ-67, MoS ₂	1,43	90 ÷ 130	20 ÷ 70	210 ÷ 310	-196 ÷ 250
ПМ-69-ДМ-3	ПМ-67, MoS ₂	1,45	85 ÷ 120	30 ÷ 50	210 ÷ 280	до 250
ПМ-67-Г10	ПМ-67, графіт	1,45	70 ÷ 98	8 ÷ 30	230 ÷ 330	до 250
ПМ-69-Г5	ПМ-69, графіт	1,47	70 ÷ 90	20 ÷ 40	220 ÷ 330	до 250
ПАМ 15-67	ПМ-67, графіт	1,42	80 ÷ 100	16 ÷ 30	300	-196 ÷ 250
ПАМ 15-69	ПМ-69, графіт	1,42	65 ÷ 80	7,8	330	-196 ÷ 250
ПАМ 50-67	ПМ-7, графіт, нітрид бору	1,62	44 ÷ 45	1,5 ÷ 5,0	270 ÷ 300	-196 ÷ 250
ПАМ 50-69	ПМ-69, графіт, нітрид бору	1,5 ÷ 1,6	30 ÷ 38	5,0	300	-196 ÷ 250

Підшипники, виготовлені з наповненого полііміда з хаотично орієнтованими графітовими волокнами, надійно працюють при тиску до 28,5 МПа і мають зносостійкість при 50 і 315 °С відповідно в 7 і 1,5 рази більшу, ніж в разі орієнтації графітових волокон вздовж напрямку ковзання. При температурі до 340 °С найбільш ефективно працюють композиції, що містять 45% графітованого волокна (коефіцієнт тертя знижується до 0,05 - 0,10) при допустимому контактному тиску 350 МПа.

Недоліками матеріалів на основі поліімідів є велика швидкість газовиділення, що в деяких випадках обмежує їх використання у вакуумній техніці, а також крихкість, що ставить особливі вимоги до технології обробки деталей. Крім того, ці матеріали мають високу вартість. Тому їх застосовують лише для виготовлення відповідальних деталей рухливих сполучень, які працюють в екстремальних умовах.

Матеріали на основі полікарбонату.

Полікарбонат застосовують в машино- і приладобудуванні, в радіо- і електротехнічній промисловості для виготовлення деталей точних верстатів, приладів, обчислювальних машин, для деталей ущільнень, клапанів та інших елементів, що працюють у вакуумі, в інертному газовому та інших середовищах при температурі -50-110 °С. т.п. Полікарбонат переробляють литтям під тиском і екструзією і застосовують в вузлах тертя що не змашуються, наприклад, в криогенній та мікрокриогенній техніці. Він стійкий до атмосферних впливів, дії води, водних розчинів мінеральних кислот і солей, окислювачів, мастил, в той же час він розчиняється в ряді вуглеводнів (ацетон, толуол і ін.), набухає в бензині. Полікарбонат придатний для роботи в умовах низьких і наднизьких температур, в середовищі газоподібного і рідкого азоту, водню і гелію при температурі до -253° С. Він має високу міцність і ударну в'язкість і стабільності властивостей і розмірів деталей в широкому інтервалі температур, малу плинність, проте погано чинить опір циклічним впливам навантаження і має низьку міцність від втоми. Ці матеріали стійкі до ультрафіолетового випромінювання і різких перепадів температур, але мають обмежену стійкість до дії іонізуючого випромінювання. У табл. 1.16 наведено склад і властивості деяких матеріалів на основі полікарбонату.

Промисловість випускає полікарбонат діфлон, наповнений на 25 % по масі скловолокном (діфлон СТН) або фторопластом (діфлон

ДАК 8) (табл. 1.17).

Таблиця 1.16 - Матеріали на основі полікарбонату

Марка матеріалу	Основні компоненти	ρ , г/см ³	Міцність, МПа	Ударна в'язкість, кДж/м ²	Твердість НВ, кг/мм ²	Гранична робоча температура, С	Метод переробки
Естеран -29	Полікарбонат, МоS ₂	1,30	-	6	200	110	пресування
ДАК-8	Полікарбонат, фторопласт-4	1,23	50 ÷ 55	105	87	115	Лиття під тиском
Естеран -35	Полікарбонат, МоS ₂	1,41	52	30÷70	140	110	
Естеран -51	Полікарбонат, МоS ₂	1,25	60	100÷200	100	110	
ДАК-12-3ВN	Полікарбонат, ВN	1,20	55	-	90	110	
ДАК-УП5Д	Полікарбонат, графіт	1,25	90	-	-	-	

Таблиця 1.17 - Результати випробувань полікарбонату ДАК-8 (тиск середовища 10 Па, швидкість ковзання 0,5м/с)

Контакт на пара	Матеріал контртіла	Контактний тиск, МПа	Коефіцієнт тертя	Інтенсивність зношування, 10 ⁻⁶
Диск-сфера	сталь ШХ15	0,3	0,11	2,54
		0,3	0,12	123
Палець-диск	сталь 12Х18Н10Т	0,3	0,08	13,0
		0,3	-	43,8
		1,0	0,14	0,029
		1,0	0,12	0,110
		2,0	0,15	0,37
		2,0	0,11	-
Горцова Диск-диск	сталь 12Х18Н10Т	1,0	0,04	0,27
		1,0	0,07	50
		2,0	0,06	67,6
		2,0	0,05	87,8

Освоєно виробництво антифрикційного полікарбонату, що представляє собою діфлон, модифікований фторопластом-4. Цей матеріал зберігає високі фізико-механічні та діелектричні властивості

полікарбонату і одночасно в $1,5 \div 2$ рази покращує антифрикційні властивості.

Для зниження коефіцієнта тертя і підвищення зносостійкості в полікарбонат вводять спеціальні наповнювачі і тверді мастила. Введення дисульфиду молібдену, графіту або 15-20 % фторопласта-4 знижує коефіцієнт тертя в 2-3 рази. До недоліків полікарбонату слід віднести схильність до утворення мікротріщин в поверхневому шарі під впливом залишкових напружень після механічної обробки і внаслідок сторонніх включень і мікропор. Тому обов'язковою фінішною операцією повинна бути термообробка для зняття залишкових напруг.

Матеріали на основі поліетилену.

Розширюється застосування **поліолефінів** (поліетилен високого тиску, поліпропілен) в якості антифрикційних матеріалів, як в чистому виді, так і в композиціях з наповнювачами. Поліолефіни стійкі до дії більшості кислот, лугів, не розчиняються в органічних розчинниках при 20°C . Однак сильні окислювачі (азотна кислота і ін.), хлор, фтор руйнують їх, і при підвищених температурах вони розчиняються в багатьох органічних розчинниках.

На основі поліолефінів створюють композиційні матеріали, вводячи різні наповнювачі (сажу, каучук, скловолокно, деревну тирсу і т.д.). Ці матеріали, що мають високу зносостійкість і коефіцієнт тертя 0,1-0,15.

До недоліків поліолефінів слід віднести їх низьку теплоємність, так як деталі вузлів тертя можуть довго експлуатуватися при температурі не вище 60°C (короткочасно до 80°C). Це знижує можливість застосування поліолефінів в машинобудуванні.

Термопластичний поліетилен використовується в якості полімерної основи композиційних самозмащувальних матеріалів завдяки своїй низькій адгезійній здатності, досить високій механічній міцності, хімічній інертності і високій технологічності.

Найбільше застосування отримав поліетилен низького тиску (ПЕНД) (табл. 1.18), що має більш впорядковану структуру макромолекул, вищі ступені кристалічності (75-85 %), щільності, механічної міцності, модуля пружності при вигині і теплостійкість. Для поліпшення триботехнічних характеристик в ПЕНД вводять фторопласт-4, гексафторетілен, дисульфід молібдену, графіт, пентапласт, поликапроамид, метали.

Таблиця 1.18 - Характеристики ПЕНД

Густина, кг/м ³	Міцність, МПа	δ , %	E_p , МПа	Ударна в'язкість, кДж/м ³	НВ, кг/мм ²	Теплопровідність, Вт/(м·К)	Інтенсивність зношування, 10 ⁻⁹	Коефіцієнт тертя
0,95	24÷42	50÷12000	650÷750	2÷120	49÷60	0,42÷0,44	1,75	0,1÷0,15

Експериментальні дослідження композиційних матеріалів на основі поліетилену показують, що підвищення зносостійкості у більшості композицій не супроводжується поліпшенням механічних властивостей, а в ряді випадків міцність і модуль Юнга знижуються при різкому підвищенні зносостійкості. У виробів з матеріалу з волокнистими наповнювачами значно підвищується розмірна стабільність, а при використанні в якості наповнювачів металевих порошків різко збільшуються теплопровідність, електропровідність і деякі інші характеристики.

Матеріали на основі поліакрилатів.

Поліакрилати - термопластичні полімери, переробляються литтям під тиском або пресуванням. Деталі вузлів тертя з поліарілату можуть працювати тривалий час при температурі 160 - 180° С, короткочасно - при температурі 230 °С. Поряд з високою теплостійкістю поліакрилат має високу опірність іонізуючим випромінюванням, хорошими діелектричними властивостями, достатньою хімічною стійкістю, морозостійкістю (може працювати при температурі до -100° С). Для поліпшення антифрикційних властивостей поліакрилат наповнюють твердими мастильними матеріалами. Згадані властивості поліакрилата показують, що це дуже перспективний матеріал для деталей вузлів тертя, особливо для тих, що не змащуються.

Широке застосування в машино- і приладобудуванні знаходять антифрикційні самозмазуючі матеріали на основі поліакрилатів для виготовлення деталей підшипників ковзання і кочення, призначених для роботи в глибокому вакуумі без змащення.

Поліакрилат марок Ф-1, Ф-2, Д-3, Д-4 та інші в чистому виді мають високий коефіцієнт тертя (0,35 ÷ 0,40) і відносно невисоку зносостійкість. З метою поліпшення триботехнічних характеристик і підвищення теплостійкості в поліакрилати додають фосфор, дисульфід

молібдену, мідь і срібло. Наприклад, композиційний матеріал Делан-524 на основі поліакрілата ДВ-101 з добавкою 15 % (масова частка) дисульфиду молібдену має найвищу теплостійкість серед полімерних матеріалів, що переробляються литтям під тиском.

Чистий поліакрилат марки ДВ має нестабільні триботехнічні характеристики через високу величину адгезійної складової сили тертя в результаті наявності гідроксильних груп і макромолекул.

Матеріали на основі епоксидних смол.

Епоксидні полімери широко застосовують при виготовленні деталей вузлів тертя унаслідок гарної адгезії епоксидних полімерів до металів та інших матеріалів, високої механічної міцності, малої усадки і водопоглинення, вібро- і лугостійкості, хороші електроізоляційні властивості. Композиційні матеріали на основі епоксидних смол (табл. 1.19) застосовують для виготовлення деталей вузлів тертя, що працюють в агресивних середовищах і в вакуумі при температурі від мінус 100 до 200 °С, у воді, газі та інших середовищах.

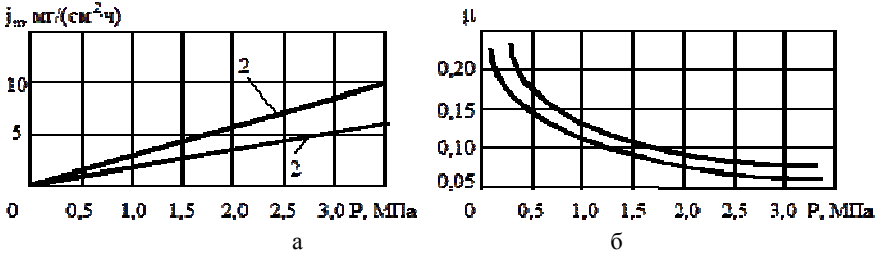
Поряд з традиційними наповнювачами (графіт, кокс, дисульфід молібдену, оксиди металів, різні волокнисті матеріали і т.п.) в епоксидні смоли вводять олігомери, поліетилен, кремнійорганічні смоли, двоокис титану та інші спеціальні добавки, що значно збільшує твердість, жорсткість, навантажувальну здатність і зносостійкість композиційних матеріалів. Властивості деяких антифрикційних матеріалів на основі епоксидних смол наведені в.

Найбільш широке застосування отримали композиційні матеріали марок АМС-1, АМС-3, АМС-5М, що відрізняються високою механічною міцністю, зносостійкістю, термостійкістю і низьким коефіцієнтом тертя. З цих матеріалів виготовляють поршневі кільця компресорів, що працюють без змащення, торцеві ущільнення, підшипники ковзання для вузлів сухого тертя з нормальною вологістю при підвищених температурах, лопатки повітряних ротаційних насосів. Триботехнічні характеристики матеріалів значно залежать від умов експлуатації. На рис. 1.3 наведені залежності масової швидкості зношування і коефіцієнта тертя від номінального тиску при терті без змащення по сталі 45 при швидкості ковзання 1м/с.

Таблиця 1.19 - Матеріали на епоксидній основі

Марка матеріала	Основні компоненти	Густина кг/м ³	Межа міцності МПа	Номінальний контактний тиск, МПа	Швидкість ковзання, м/с	Інтенсивність зношування, 10 ⁻⁸	Коефіцієнт тертя
АМС-1	Епоксикремній - органічна смола, кокс, нітрид бора	1,77	—	5,0	0,5	0,1	0,08
АМС-3	Епоксикремній - органічна смола, електродний та кристалічний графіт	1,79	—	5,0	0,5	0,22	0,10
АМС-5М	Епоксикремній - органічна смола, вуглецева тканина	1,23	—	2,0	0,5	0,05	0,11
ЭДМА - 10	Епоксидна смола, наповнювач	1,90	8,0	2,0	0,06	2,0	0,23
Э10Н5	Епоксидна смола, графіт, нікель	1,35	9,5	0,65	1,0	1,2	0,35

Підвищення температури від 50 до 250 °С викликає зниження коефіцієнта тертя композиційних матеріалів в 1,5-2 рази, при подальшому підвищенні температури до 300 °С коефіцієнт тертя практично не змінюється або незначно зростає.



1 - АМС -1; 2 -АМС-3

Рисунок 1.3 - Залежність швидкості зношування (а) і коефіцієнта тертя (б) від номінального контактного тиску

Підвищення температури від 50 до 250 °С викликає зниження коефіцієнта тертя композиційних матеріалів в 1,5-2 рази, при подальшому підвищенні температури до 300 °С коефіцієнт тертя практично не змінюється або незначно зростає.

Матеріали на основі фенолформальдегідних полімерів (ФФП).

Фенолформальдегідні полімери (ФФП) широко застосовують при створенні антифрикційних полімерних матеріалів, внаслідок їх підвищеної термічної і хімічної стійкості і зносостійкості. Для поліпшення триботехнічних властивостей вводять спеціальні наповнювачі (графіт, свинець, MoS_2 , оксиди алюмінію, заліза і міді, а також базальтові, скляні та вуглецеві волокна, технічний вуглець, азбест, різні волокна), що дозволяє отримати самозмазуючі матеріали з низьким коефіцієнтом тертя без мастила (0,04-0,06) і інтенсивністю зношування (10^{-9} - 10^{-11}) для підшипників ковзання, ущільнень, які направляють, що працюють при підвищених температурах. Відомі самозмазуючі матеріали на основі ФФП наступних марок: АТМ-1, АТМ-1Т, Вілан-9Б, Синтек-2, АМАН-24. Матеріал марки АТМ-1 має високі зносостійкість і теплопровідність, але він крихкий, тому його застосовують у вузлах тертя, які не працюють при ударних навантаженнях. Для усунення цього недоліку використовують волокнисті наповнювачі (вуглецеві і органічні волокна) або тканини, наприклад, в матеріалах марки Синтек.

1.2.2.2 Неорганічні матеріали

До них відносяться графіт, мінеральне скло, ситали, кераміка. Вони хімічно-, вогне- та термостійкі, великої твердості, проте підвищено крихкі, погано переносять різку зміну температур.

Графіт.

Графіт має гарні антифрикційні властивості $f = 0,28$ тому він застосовується в якості антифрикційного матеріалу, основною перевагою якого є здатність працювати без змазування в умовах високих і низьких температур, великих швидкостей, агресивних середовищ.

Недоліком графіту є схильність його до окислення, починаючи з температур 400 °С, з виділенням газоподібних процесів.

Графіт застосовують у конструкціях літальних апаратів та їх двигунів, що нагріваються до високих температур, як антифрикційний матеріал і у виді вуглеграфітових волокнистих виробів.

Неорганічне скло.

За призначенням всі стекла поділяють на технічні (оптичні, світлотехнічні, електротехнічні, хіміко-лабораторні, приладові, трубні); будівельні (віконні, вітринні, армовані, склоблоки) і побутові (склотара, посудні, побутові дзеркала)

Ситали.

Отримують на основі неорганічних стекел шляхом їх повної або часткової кристалізації.

Ситал - скло і кристал займає проміжне положення між склом і керамікою. Від неорганічних стекел вони відрізняються кристалічною будовою, а від кераміки - більш дрібнозернистою структурою.

Ситали отримують шляхом плавлення скляної шихти (оксиди Al_2O_3 , SiO_2 , MgO , CaO та інші) з добавкою каталізаторів (солі Au , Ag , Cu), охолодження до пластичного стану і формуванню з них виробів і наступної кристалізації (ситалізації).

На відміну від звичайного скла властивості, якого визначаються в основному його хімічним складом, для ситалів вирішальне значення мають структура і фазовий склад. Причина цінних властивостей ситалів полягає в їх виключній дрібнозернистості і в відсутності пористості. Вони мають велику стійкість проти абразивного зношування, високу твердість, порівняно із загартованою сталлю, але

характеризуються підвищеною крихкістю.

Застосування – підшипники, деталі для двигунів внутрішнього згоряння та соплореактивних, фільтри для витягування синтетичних волокон, тонкі калібри, футерування для абразивних матеріалів.

1.2.2.3 Природні антифрикційні матеріали

В їх число входять деревина, дорогоцінні камені, шкіра та інші.

Деревина.

В чистому виді застосовується рідко. Деревина має характерну будову: високоміцні волокна і целюлоза пов'язані в жорстку і міцну капілярно-пористу структуру.

Для підвищення антифрикційних властивостей деревини її просочують різними мастилами або суспензіями, що містять саме змащувальні добавки.

Для підвищення механічних властивостей її після просочення пресують, причому найбільш придатна в якості антифрикційної поверхня поперечного зрізу, на яку виходять сокопроводячі канали. Через ці канали мастила або самозмащувальні добавки утворюють на поверхні шар з позитивним градієнтом механічних властивостей.

Пресована наповнена деревина використовується в слабо навантажених пристроях при невеликих швидкостях ковзання, в суднобудуванні, будівництві, сільському господарстві, текстильній промисловості. Наприклад: дейдвудні підшипники в суднобудуванні, повзуни лісопильних рам, підшипники стрічкових конвеєрів.

Перевага антифрикційної деревини: легко припрацьовується, самозмащується, має високу несучу демпфуючу здатність: низьку вартість і простоту виготовлення деталей.

Недоліки: низькі теплопровідність і теплостійкість, схильність до набухання.

Коштовне каміння.

Алмаз, рубін, сапфір і ін. - дуже дорогі антифрикційні матеріали. Вони застосовуються для опор ковзання в приладах, наприклад, в годинниках, гіроскопах.

Отримання синтетичних кристалів цих каменів дозволило розширити галузь їх застосування.

Переваги: слабка молекулярна взаємодія з твердими тілами, мала площа фактичного контакту, низький коефіцієнт тертя і підвищена зносостійкість.

1.3 Умови експлуатації підшипників і властивості, які необхідно враховувати при виборі антифрикційних матеріалів

Підшипники деталей, різні втулки, шарнірні з'єднання і інші деталі нерідко руйнуються внаслідок утворення і розвитку втомних тріщин. При цьому на монометалевих підшипниках утворюються наскрізні тріщини, а на біметалевих вкладишах вищерблення шару антифрикційного сплаву.

Руйнування підшипників внаслідок викришування антифрикційного шару часто виникає в зв'язку зі створенням і використанням форсованих двигунів автомобілів, тракторів, судів, тепловозів. Підвищення навантаження і високі окружні швидкості посилюють роботу вкладишів.

Втомні руйнування підшипників протікають переважно під дією пульсуючих напружень стиску. Характер пошкоджень вкладишів принципово не відрізняється, незважаючи на відмінність властивостей металів. У всіх випадках руйнування починається з поверхні на ділянках максимальних контактних напружень, що мають дефекти або мікроструктурні недосконалості. Тріщина розвивається в глибину шару, доходить до кордону з міцною основою і надалі поширюється по проміжному прошарку, який є, як правило, менш міцним, ніж основний метал. Процес виникнення і розвитку тріщин втоми протікає в підшипниках ковзання в специфічних умовах. Поверхні тертя антифрикційного сплаву відчувають змінні навантаження, що передаються через шар мастила, що володіє певною поверхневою активністю. При цьому режими тертя змінюються від рідинного до граничного і іноді до сухого. Істотно змінюється і нагрів поверхонь, що труться. З урахуванням цих особливостей процес втоми підшипникових матеріалів визначається не тільки розвитком тріщин від впливу змінного навантаження, а й напруженнями від термічних впливів, корозійної втоми і втомою під впливом тертя.

1.3.1 Характер та величина навантаження

У реальному і нестационарно навантаженому підшипнику діючі сили змінюються в залежності від кута повороту вала, при цьому істотно змінюється величина максимальних навантажень від дії тиску газів і від інерційних сил, термін дії яких більш тривалий. Одночасно накладаються статичні стискаючі напруги від затягування вкладишів і термічні напруги від нагрівання, величина яких різко зростає при великому розходженні в температурних коефіцієнтах лінійного розширення матеріалу підшипника і вкладишу. Вихід його з ладу в великій мірі залежить від впливу інерційних сил.

На утворення і подальший розвиток тріщин істотний вплив мають напруження розтягу. Вони нерідко виникають внаслідок конструктивних особливостей підшипників, впливу експлуатаційних параметрів і ін.

По-різному діє на пошкоджуваність підшипників рівень їх нагрівання. Для легкоплавких м'яких бабітів втомна міцність різко знижується при збільшенні температури. При тій же мірі нагріву для алюмінієвих і мідних сплавів зниження втомної міцності незначно. Для біметалевих підшипників зміна температури нагріву призводить до зміни величини і знака залишкових напружень в антифрикційному шарі. З огляду на те, що робочі температури, зазвичай, перевищують 60°C , в підшипниках, виготовлених з Al і Zn сплавів, будуть виникати залишкові стискаючі напруги.

Зміна температури в інтервалі, що викликає зміну знака напружень, може сприяти прискоренню утворення втомних тріщин. Дискретність процесу тертя призводить до місцевих перегрівів, на ділянках яких виникають максимальні контактні напруги від впливу зовнішніх сил. В цьому випадку сума напруг може перевищити допустимий рівень. Наслідком цього може бути утворення тріщин втомі після невеликого терміну служби (малоциклова втома).

1.3.2 Конструктивні особливості підшипників

Для втомної міцності має велике значення товщина антифрикційного сплаву. Найбільш висока втомна міцність реалізується у шарів товщиною в кілька сотих міліметрів. Такі шари м'якого металу відносяться до поверхневих покриттів. Будучи нанесеним на міцний метал, вони полегшують припрацювання і частіше виходять з ладу через знос, ніж через втомні пошкодження. В цьому випадку втомна міцність бабіта порівнянна з міцністю свинцевої бронзи або Al сплавів.

До обрання конструктивних розмірів підшипників (відношення ширини вкладиша до діаметру, конфігурація поверхонь тертя, мастильних канавок) підходять з урахуванням поліпшення гідродинамічних характеристик. При цьому зростає опірність підшипника втомним руйнуванням. Прагнуть створити таку конструкцію, яка усуває режим виникнення граничного тертя, при цьому в підшипнику знижується величина максимальних тисків в змащувальному шарі.

Виникнення і розвиток тріщин втоми пов'язане з поверхневими пороками, дефектами виготовлення, ризиками, вм'ятинами та іншими пошкодженнями, що викликають концентрацію напруг. Останні особливо відчутно позначаються на підшипниках, що мають механічне кріплення антифрикційного шару до корпусу. Так, наприклад, при наявності раковин в бабітовому шарі вагонних підшипників тріщини втоми виникають після двомісячної експлуатації.

1.3.3 Змащувальне середовище

Мастило в процесі тертя взаємодіє з матеріалом підшипника і цапфи і впливає на їх службові властивості. Порівняно різко знижується втомна міцність підшипників із шаром свинцевої бронзи при роботі з мастилами, що містять розчинені органічні кислоти, які викликають виборчу корозію свинцевою складовою і знижують втомну міцність. Особливо різко зростає корозія з підвищенням температури і при попаданні в мастило води. На корозію

свинцевої складової сильно впливає сорт мастила. Значна корозія відбувається в мастилі марок М12 і М12Б.

Для ряду матеріалів агресивна дія мастила з потужними присадками, здатними стравлювати окисну плівку з антифрикційного сплаву, також знижує втомну міцність підшипників. Наприклад, термін служби підшипників дизелів тепловозів із шаром бабіту БК2 при використанні мастил з присадками ВНДІ НП-366 і ЦИАТИМ-339-знижується.

Проведені випробування показали, що в порівнянні з бабітом втомна міцність свинцевих бронз в 1,8, а АІ сплавів - в 3,5 рази вище; витривалість - свинцюватої бронзи в 1,8, а АІ сплавів - 2,5 рази вище.

1.3.4 Припрацьовуємість

Приробітка поверхонь тертя здійснюється за рахунок пластичного деформування і зносу. Пластичне деформування переважно розвивається у підшипників, що мають порівняно грубу пригонку і м'який антифрикційний шар. Чим більше твердість підшипникового сплаву, чим більше опірність місцевої пластичної деформації, тим при рівних умовах, приробітка підшипників потребує більшої тривалості.

Твердість антифрикційних матеріалів при температурі $+100^{\circ}\text{C}$ становить: Б83 - 14,5 НВ; Б16 - 17,5 НВ; БКА - 16 НВ; ЦАМ9 - 1,5-50 НВ; АО20-1 - 30НВ; БрС30 - 26НВ.

В умовах дії абразивів приробітка прискорюється при збільшенні шляху, пройденого абразивними частинками і їх відносному переміщенні між валом і підшипником.

Якщо в процесі зносу відбувається перенесення металу і утворення тонких захисних плівок металу, що спостерігається у антифрикційних сплавів, які мають м'яку структурну складову (Бр.С30, АО20-1, АО9-1 і ін.), то процес приробітки буде протікати прискорено. У разі, коли в результаті схоплювання буде проявлятися глибинне виривання, супроводжуване утворенням наростів і виривами металу, процес приробітки ускладнюється. Вона полегшується також при виникненні умов для утворення виборчого перенесення, коли на поверхні тертя взаємодія із мастильним середовищем призводить до

виборчої корозії більш хімічно активних компонентів. У мідних сплавах такими металами є цинк, олово і ін.

1.3.5 Опірність зношуванню

У період сталого режиму роботи відбувається знос і підшипників, і шийок вала.

Залежно від матеріалу підшипника сталевий вал зношується в різному ступені. Якщо в якості еталону використовувати пару тертя бабіт Б83 (найм'якший металевий матеріал) - сталевий вал, тобто $E = 1$, то сталевий вал в парі зі сплавом АО9-2 з покриттям, що містить дисульфід молібдену має відносний знос 1,45, з алюмінієвим сплавом АО9-2 з покриттям, що містить 10 % Sn і 90 % Pb - 1,95, з сплавом АО9-2 без покриття - 3,5, зі свинцюватою бронзою Бр.С30-4.

1.3.6 Сумісність елементів пари тертя

При роботі в режимі граничного тертя або тертя без змащення опірність зношування і утворення задирів багато в чому визначається видом підшипникового матеріалу, металу вала і типом мастильного середовища. Вибір елементів пари, що треться, здійснюється з урахуванням їх сумісності. Під сумісністю розуміють здатність даної пари при прийнятому мастильному середовищі або у відсутності мастила пристосовуватися один до іншого в процесі взаємного переміщення, забезпечуючи задану довговічність без пошкоджень поверхонь тертя, що призводять до виходу з ладу деталей.

Стійка тривала робота пари, що треться, без істотних пошкоджень спостерігається при рідинному режимі тертя, хоча іноді спостерігаються корозійні пошкодження і особливо кавітаційне руйнування поверхонь тертя. В реальних же умовах підшипник, як правило, працює в напіврідинному режимі, коли одночасно виявляються об'ємні і поверхневі властивості мастил.

Вплив матеріалу підшипника і вала в значній мірі проявляється в здатності при режимі граничного тертя утворювати менш або більш

міцні граничні плівки, здатні підвищити або знизити тертя.

Міцність масляної плівки і ефективність захисту поверхонь, що труться, від схоплювання залежить багато в чому від температури в зоні контакту. Реакція вузлів, що труться на підвищення температури різняться в залежності від сорту мастила, його в'язкості, ступеня очищення і багато в чому визначається типом матеріалу підшипника і цапфи і шорсткості їх поверхні.

Величина критичної температури, при якій утворюється десорбція граничного шару, зростає при легуванні алюмінієвих і мідних сплавів. Найбільш високі температури переходу до режиму граничного тертя спостерігаються при випробуванні м'якого бабіту марки БК2, найгірші показники у твердого цинкового сплаву, і проміжне положення займає сплав АСМ.

1.3.7 Задиристійкість

Вплив виду підшипникових матеріалів позначається на утворенні задири і на ступені пошкодження поверхонь тертя в результаті проходження цього процесу.

Одним з необхідних умов утворення задири є руйнування (десорбція) граничної плівки мастила, при якому контактні напруги стають близькими до граничних. Умова ж утворення граничного тертя і стійкості граничної плівки багато в чому визначаються матеріалом підшипника і цапф. Кращим матеріалом в цьому відношенні є м'які бабіти, потім сплави, що містять м'які структурні складові (сплави АО20-1, АО9-1, Бр.С30). Гірше поводяться, як правило, тверді антифрикційні сплави без включень м'яких металів. У зв'язку з цим підшипники, виготовлені з таких матеріалів, мають тонкошарові покриття м'яких металів (0,01-0,03 мм).

Після руйнування граничного шару поведінка матеріалів залежить від опірності схоплюванню. Оскільки процес схоплювання двох поверхонь при терті супроводжується великим виділенням тепла, відбувається порівняно швидке нагрівання поверхневих шарів, аж до плавлення всього металу, або легкоплавкої структурної складової.

Умовно антифрикційні сплави можна розбити на три групи, кожна з яких має відмінні риси схоплювання і опірності задири.

1. Сплави на олов'яній і свинцевій основі. Їх температура плавлення не перевищує 350°C . Схоплювання відбувається в тонкому поверхневому шарі, при цьому на поверхні підшипника спостерігаються дрібні риси і виривання, а на поверхні цапфи - перенесений (намазаний) антифрикційний матеріал.

2. Сплави на цинковій основі і Al-сплави з м'якими структурними складовими (олово, свинець, кадмій). Їх температура плавлення не перевищує 650°C . Схоплювання відбувається в тонкому поверхневому шарі і може супроводжуватися глибинним вириванням. При цьому на поверхні підшипника спостерігаються дрібні і великі риси і виривання, а на поверхні цапфи – риси.

3. Сплави на алюмінієвій основі без м'яких структурних складових і сплави на мідній основі. Їх температура плавлення досягає 1000°C . Схоплювання супроводжується глибинним вириванням металу. При цьому на поверхні підшипника спостерігаються риси і виривання металу, а на поверхні цапфи-риски, виривання металу і сітка термічних тріщин.

В процесі схоплювання сполучених поверхонь інтенсивно розвивається пластична деформація. Залежно від умов роботи вузла тертя при цьому або спостерігається зміцнення антифрикційного сплаву, що визначається, перш за все, по збільшенню твердості, або при достатньому тепловідленню відбувається гаряча деформація антифрикційного сплаву вище порога рекристалізації. В цьому випадку зміцнення не спостерігається. Ступінь зміцнення при наклепі в результаті пластичної деформації визначає головним чином і ступінь пошкодження при схоплюванні.

За опірності схоплюванню при терті антифрикційні сплави розташовуються в наступному порядку: БК2, Б83, АО20-1, АО9-1, ЦАМ10-5, ЦАМ9-1.5, АО9-2, АС15-0,5.

2 ФРИКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

2.1 Вимоги, що пред'являються до матеріалів

Швидкий розвиток техніки викликає необхідність застосування особливо форсованих режимів роботи гальмівних пристроїв на літаках, екскаваторах, бурильних лебідках, автомобілях і залізничних

вагонах. Важкі умови роботи гальм висувають підвищені вимоги до їх конструкції і особливо до властивостей матеріалів, що застосовуються в якості пар тертя. Прагнення зробити гальма компактними і одночасно з цим збільшення швидкостей і ваги машин привели до того, що кількість кінетичної енергії, що припадає на 1 см^3 об'єму колеса гальма, за останні роки зростає в кілька разів; наприклад, для автомобілів в 3-4 рази, а для літаків в 10 разів.

На відміну від антифрикційних, фрикційні матеріали повинні мати високий ($0,2 < f < 0,5$) і стабільний коефіцієнт тертя, достатню зносостійкість, міцність, стійкість до температурних перепадів, впливу абразиву і агресивних середовищ, високу фрикційну теплостійкість (здатність пари тертя зберігати стійке значення коефіцієнта тертя і малий знос в широкому діапазоні температур); повинні задовільно оброблятися на верстатах; мають бути мастилостійкими, водостійкими, безшумними в роботі, стійкими в арктичних і тропічних умовах. Чавун, металокерамічні та інші подібні матеріали мають надійно зварюватися і склеюватися з каркасом з вуглецевих сталей, а також з легованими і жароміцними сплавами.

Зокрема, матеріали гальм і фрикційних муфт повинні забезпечувати плавне спрацьовування системи без автофрикційних коливань, що виявляються в формі скрипу при гальмуванні, або пробуксовки і забезпечувати високий термін служби. При гальмуванні вся кінетична енергія транспортного засобу в гальмах розсіюється в тепло. Тому в момент гальмування температура поверхонь, що труться, наприклад, в гальмі літаків, досягає 1200°C , а в обсязі гальмівної накладки - до 600°C . У гальмах автомобілів ці температури відповідно можуть досягати 400 і 200°C . В процесі гальмування авіаційного колеса допускається зміна коефіцієнта тертя не більше, ніж на $\pm 15\%$. Процес тертя має бути плавним, без стрибків і вібрацій, для чого величина коефіцієнта тертя повинна, по можливості, зростати зі збільшенням швидкостей або принаймні, як можна менше падати. Стійкість коефіцієнта тертя дуже важлива, так як при зменшенні його зі швидкістю (температурою) не буде забезпечене ефективне гальмування. Це, так зване, в'янення гальма, коли при тривалому і повторному гальмуванні гальмо не зупиняє машину.

Існують матеріали, у яких має місце необоротна зміна їх властивостей при нагріванні. Якщо значення коефіцієнта тертя у них знижується, то вони не можуть бути використані як фрикційні.

2.1.1 Припрацьовування

Елементи фрикційної пари повинні припрацьовуватись досить швидко, так щоб при першому гальмуванні гальмівний момент становив не менше 80...120 % від розрахункової величини. При цьому на поверхні тертя не повинні утворюватися задири.

Через неточності виготовлення, викривлення, шорсткості, хвилястості і т.п. колодки, сектори дисків і інші деталі, виконані з фрикційних матеріалів, при установці не мають точного прилягання до поверхні гальмівного барабана або диска, і дотик їх відбувається на окремих ділянках, площа яких становить незначну частину від номінальної площі.

У період підробітки в точках фактичного контакту виникають великі температури, в результаті яких викликається швидкий локальний знос. З плином часу такий послідовний локальний знос призводить до того, що поверхня дотику поступово збільшується, приймаючи характерну для даного режиму роботи шорсткість.

Для процесу підробітки характерна зміна температури від максимальної до деякої середньої усталеною, при одночасному збільшенню моменту гальмування.

Таким чином, припрацьовування характеризується двома процесами: збільшенням фактичної площі торкання гальмівної обшивки з барабаном і утворенням на поверхні тертя фрикційного матеріалу робочого шару, що має стійкі фрикційні характеристики, причому цей шар безперервно відновлюється в міру його зношування.

2.1.2 Несхоплюємість

Елементи пари тертя не повинні схоплюватися як в процесі гальмування, так і в інших випадках, наприклад, після гальмування, коли гарячий гальмо залишається загальмованим.

Деякі фрикційні пластмаси при високих температурах починають горіти і взаємодіяти з чавуном, що призводить до термічного схоплювання поверхонь, а це, в свою чергу, може викликати заклинювання гальма.

Для роботи пластмасових матеріалів при високих температурах в їх склад вводять металевий дріт. Останній, розм'якшуючись при термічному розкладанні пластмаси, створює на поверхні проміжний шар, що відокремлює пластмасу від чавуну і є як би напівтвердим мастилом, що виробляється з самого матеріалу. Цей шар, що містить тверді частки продуктів розкладання пластмаси, забезпечує високий коефіцієнт тертя.

Матеріалом дроту може бути мідь і її сплави. Дуже важливо, щоб температура розм'якшення металеві добавки була нижче температури деструкції пластмаси. Корисно вводити в пластмасу протизадирні присадки, які створюють в поверхневому шарі одночасно фрикційні частки і протизадирну плівку наприклад, барит (BaSO_4).

Високі протизадирні властивості має металокераміка КЦ-4, яка дає досить високий і стабільний, при зміні температури, коефіцієнт тертя. У ній міститься велика кількість міді, графіту і двоокису кремнію в якості матеріалів, що створюють поверхневий фрикційний шар (вихідна структура - середньопластинчастий перліт - є структурою, яка забезпечує хороші фрикційні властивості).

2.1.3 Корозійна стійкість

Елементи фрикційної пари повинні мати достатню корозійну стійкість при тривалому перебуванні у вологій атмосфері (до 100 %) і температурі від - 60 до +150⁰ С; не викликати корозію, пов'язаних з ними деталей з маловуглецевих, легованих сталей, алюмінієвих і магнієвих сплавів.

2.1.4 Вогнебезпечність

При гальмуваннях, а також безпосередньо після гальмування фрикційні матеріали та продукти їх зносу або розкладання не повинні загорятися полум'ям з виділенням диму і неприємних запахів.

2.1.5 Механічна міцність

Повинна становити при граничній температурі, яка розвивається в гальмі, що не менше $1,5 \text{ кг} / \text{см}^2$.

При багаторазових гальмуваннях фрикційні матеріали повинні добре протистояти тепловому удару, що виникає при інтенсивному гальмуванні. При цьому не може відбуватися сколювання фрикційного матеріалу, радіальних та інших залишкових деформацій деталей, а також розшарування деталей (при багат шаровому їх виконанні), утворення тріщин і інших пошкоджень, які порушують роботу гальма.

2.1.6 Зносостійкість

Знос елементів пари тертя не повинен перевищувати заданих значень. Зазвичай заміна гальмівних накладок пов'язана зі значними труднощами. Крім того, при зносі збільшуються зазори, що також порушує роботу гальмівної пари. У зв'язку з цим необхідно, щоб матеріал забезпечував досить тривалу роботу. Так, наприклад, автомобільні колодки зазвичай змінюють через 40 тис. км пробігу, коли знос їх сягає приблизно 4 мм. Колодки нафтобурових лебідок витримують 15-20 спуско-підйомних операцій. У літакових гальмах знос не повинен перевищувати 0,3 мм на одного гальмування. Колодки екскаваторів доводиться міняти після виїмки 100 м^3 ґрунту.

2.1.7 Стійкість проти теплової втоми

Бажано, щоб матеріал мав велику теплопровідність і теплоємність.

Багаторазове нагрівання та охолодження гальмівних колодок призводить до виникнення в них температурних напружень. Вони бувають вище напружень від дії механічних навантажень. Це може привести до руйнування матеріалу внаслідок теплової втоми.

2.2 Процеси, що відбуваються в матеріалах

При контактуванні двох поверхонь в умовах сухого або напіврідинного тертя завжди відбувається їх взаємне впровадження внаслідок гетерогенності структури (тобто структура являє собою суміш пластичної основи з дрібними твердими частинками) або різної орієнтації окремих зерен. Неоднакова глибина впровадження виступів, що контактують призводить до різних видів порушення фрикційних зв'язків. При малих навантаженнях має місце пружне і пластичне відтиснення матеріалу деформуючим виступом. Останнє частіше спостерігається для фрикційних матеріалів, які працюють в середніх по навантаженості гальмівних пристроях.

При великих навантаженнях пластичні деформації досягають граничних значень і настає процес мікрорізання. Крім взаємного впровадження окремих майданчиків і молекулярного схоплювання поверхневих плівок (яке має місце завжди), в деяких з'єднаннях при терті можливо схоплювання матеріалів, що труться. Останнє призводить до глибинного виривання матеріалів, що зчепилися (задири і подряпини).

Для оцінки впливу схоплювання на знос необхідно враховувати як можливість схоплювання, так і характер руйнування поверхонь тертя після нього.

При великих швидкостях ковзання робота формозміни, сконцентрована в тонкому поверхневому шарі, переходячи в тепло, високо піднімає місцеву температуру, створюючи температурний градієнт. Сильно розігрітий поверхневий шар має знижену міцність. Виникає позитивний градієнт механічних властивостей по глибині. У цьому шарі локалізуються процеси руйнування фрикційних зв'язків.

Створення у поверхонь тертя тим чи іншим способом позитивного перепаду механічних властивостей по глибині, є одним з методів підвищення зносостійкості фрикційних матеріалів.

Градієнт механічних властивостей можна здійснити штучним введенням між поверхнями тертя проміжного шару або шляхом застосування матеріалу, який під дією високих швидкостей і градієнта температур в результаті різних фізико-хімічних процесів в контактному шарі мимовільно створював би цей проміжний шар.

Для таких фрикційних матеріалів, як ретінакс і металокераміка КУ-1, характерне утворення в процесі тертя тонкого поверхневого шару, цей шар є як би пластичний, вузький, теплопровідний мастилом, що виробляється з самого матеріалу. Поверхневий шар, будучи пластичним при кімнатній і особливо при підвищених температурах, в порівнянні з основними матеріалами фрикційної пари, забезпечує створення позитивного переходу механічних властивостей по глибині і добре протистоїть передеформуванню. Пластичність поверхневого шару сприяє зниженню місцевих питомих тисків, зменшенню поверхневих температур і добрій приробці.

Поверхневий шар має гетерогенну структуру. Присутність в поверхневому шарі мікроскопічних твердих частинок сприяє підвищенню опору на зсув. Якщо матеріали в процесі тертя утворюють на поверхні тверді шари, що створюють негативний градієнт механічних властивостей по глибині, то вони не забезпечують достатню зносостійкість пари і працюють незадовільно.

Для ефективної роботи фрикційної пари важлива не тільки вимога високої зносостійкості при форсованих режимах гальмування, але і забезпечення високого і стабільного при різних швидкостях і температурах коефіцієнту тертя. Найбільш ефективним буде той матеріал, у якого відношення коефіцієнта тертя до інтенсивності зносу найбільше. Стале значення f/I може забезпечити тільки той матеріал, у якого фізико-механічні властивості незначно змінюються від температури. Однак більшість матеріалів характеризуються тим, що їх властивості сильно залежать від температури. Для досягнення стійкого значення f/I матеріал в зоні контакту повинен мати особливу структуру і властивості, що забезпечують достатній опір пластичному відтискуванню при високих температурах, відсутність пошкоджень поверхонь тертя основних матеріалів, тобто міцність зв'язку елементів проміжного шару повинна бути менше міцності зв'язку частинок в основних матеріалах пари, що третяся. Так як у важконавантажених гальмах при високих швидкостях ковзання температура досягає настільки великих значень (до 1200°C), що відбувається розпад неметалічних фрикційних матеріалів, важливо, щоб його продукти відрізнялися достатньою зносостійкістю і високими фрикційними властивостями.

Виникаючі при терті температури, призводять до розкладання сполуки. У процесі її розкладу відбувається утворення рідких і

газоподібних продуктів деструкції. Рідкі продукти розпаду органічної сполуки безпосередньо впливають на фрикційну теплостійкість і зносостійкість. Газоподібні продукти деструкції складаються з вуглекислого газу CO_2 , органічних речовин, що згорають при високих температурах і обумовлюють при терті спалаху і горіння пластмасових фрикційних матеріалів, а також окису вуглецю CO , що створює умови для протікання хімічних перетворень з неорганічними інгредієнтами.

Відновно-окисні процеси, що протікають при терті в умовах високих температур, поширюються на значну глибину фрикційного матеріалу і призводять до утворення нової фрикційної поверхні з новим складом і новою структурою. Введення до складу неметалевих фрикційних матеріалів незначних добавок хімічних реакційних речовин забезпечує регулювання процесу розпаду органічної сполуки, що, в свою чергу, дозволяє регулювати фрикційні властивості і дає можливість скоротити або повністю знищити явище спалахів і горіння фрикційних неметалічних матеріалів.

2.3 Види фрикційних матеріалів

Існують наступні види фрикційних матеріалів:

- а) металеві;
- б) азбокаучукові;
- в) азбосмоляні;
- г) органічні;
- д) металокерамічні.

Контртілом зазвичай служать сталі з високим вмістом вуглецю і леговані, що пройшли термообробку, чавуни.

До металевих фрикційних матеріалів відносять сірі чавуни, що працюють зазвичай в парі з високовуглецевими сталями У7, У8. У чавунах вуглець міститься у виді графіту, який разом з продуктами зносу створює на контакті плівку, що має знижений опір зсуву. Недоліком таких пар є малий коефіцієнт тертя, позитивні якості - низька вартість і надійність. Ці пари застосовуються в гальмах коліс залізничного транспорту.

Для особливо важких умов роботи застосовують титанові сплави.

2.3.1 Органічні фрикційні матеріали

Органічні фрикційні матеріали (дерево, шкіра, пробка, повсть, гума) застосовуються в слабо навантажених вузлах тертя (гальмах, фрикційних передачах, органах безпеки), в основному в приладах. Однак фрикційні пасові передачі і запобіжні пристрої, що використовують органічні матеріали на основі гуми, застосовуються і в машинах самого різного призначення: від сільськогосподарських комбайнів до потужних пресів важкого машинобудування. Область застосування органічних матеріалів обмежена через їх низьку теплопровідність і теплостійкість, у зв'язку з чим вони не можуть працювати при тривалому відносному ковзанні в важко навантаженому контакті. Крім того, вони мають високу вартість.

2.3.2 Фрикційні матеріали одержувані методами порошкової металургії

Матеріали на основі заліза (табл. 2.1) і міді, одержувані методом порошкової металургії, отримали найбільшого поширення.

Таблиця 2.1 - Склад фрикційних порошкових матеріалів на основі заліза

Марка матеріалу	Масова частка, %						Інші добавки, %
	Fe	Cu	Ni	графіт	SiO ₂	азбест	
ФМК - 8	45	-	25	7	-	-	10Cr; 6W; 7Cu ₂ S
ФМК - 11	64	15	-	9	3	3	6BaSO ₄
МКВ - 50А	64	10	-	8	-	3	5FeSO ₄ ; 5SiC; 5B ₄ C
СМК - 80	48	23	-	-	-	-	6,5Mn; 6,5BN; 10B ₄ C; 3,5SiC; 2,5MoS ₂

Перші три матеріали розроблені для важконавантажених гальм, муфт літаків і військової техніки. Матеріал СМК-80 застосовується в гальмах і муфтах зчеплення великовантажних автомобілів - кар'єрних самоскидів вантажопідйомністю понад 65 т.

Спечені матеріали на основі міді (табл. 2.2) також широко використовуються у важких транспортних засобах. Найбільшого поширення набув матеріал МК5 (перший рядок табл. 2.2). У автомобіле- і тракторобудуванні з цих матеріалів виготовляють

гальмівні диски, колодки і накладки для муфт зчеплення.

Таблиця 2.2 - Склад фрикційних порошкових матеріалів на мідній основі

Масова частка, %							Інші добавки, %
Cu	Sn	Pb	Fe	графіт	азбест	SiO ₂	
68÷76	8÷10	7 ÷ 9	3 ÷ 5	6 ÷ 8	-	-	-
60÷75	6÷10	20	5	1 ÷ 8	-	-	Ti, V, Si, 6 MoS ₂ , 2÷10 As
18	2	3	3	3	30	-	40 % - скляного волокна, 10 % - сульфїду Al
68÷86	5÷10	5 ÷ 15	2	4 ÷ 8	3	3	до 2 Ni
75	8	5	4	1 ÷ 20	-	-	0,75 Si, 6 Zn

Порошкова технологія дозволяє отримувати фрикційні матеріали із заданими властивостями. Для автомобілів малої і середньої вантажопідйомності і для сільськогосподарських і промислових тракторів малої і середньої потужності зазвичай використовуються фрикційні матеріали на полімерній основі. Вони застосовуються також у сільськогосподарському та дорожньо-будівельному машинобудуванні, в буровій техніці і т.д.

Як правило, до складу матеріалів входять три компоненти:

- теплостійкий армуючий матеріал з міцними волокнами, наприклад азбест (15 ÷ 16 %);
- теплостійкі з високим і стабільним коефіцієнтом тертя порошкоподібні наповнювачі неорганічного походження (20 ÷ 60 %);
- полімерне зв'язуюче: натуральні і синтетичні каучуки, синтетичні смоли (15 ÷ 30 %) з вулканізаційними агентами або затверджувачами, прискорювачами і активаторами вулканізації або затвердіння.

Найбільш поширеним армуючим елементом є унікальний природний мінерал, що видобувається відкритим способом - азбест. Елементарні волокна азбесту мають вид трубок із зовнішнім діаметром близько 32 нм і внутрішнім - 2,6 нм, тобто в поперечному напрямку волокно має розміри, характерні для колоїдно-дисперсних матеріалів. Елементарні волокна упаковані в пасма діаметром від декількох десятків до сотен мікрометрів, де утримуються силами міжмолекулярного тяжіння. Середня довжина волокна становить 1÷3 мм. За своєю хімічною природою азбест є водним силкатом магнію. Волокна азбесту мають високу міцність на розтягнення (до 3 ГПа), що набагато перевищує міцність сталі. Порожнини волокон

частково або повністю заповнені водою, яка утворює на внутрішній поверхні практично мономолекулярний шар, тому вона проявляє властивості інші, ніж звичайна волога, віддаляючись лише при температурі вище 425° С. Вид кристалічної решітки цього матеріалу достовірно не встановлено. Азбест має високий коефіцієнт тертя (до 0,8), який слабо змінюється в залежності від температури. Те ж можна сказати про міцність волокон, яка при нагріванні до 400° С знижується всього на 20 %. Лише при 800° С спостерігається руйнування волокнистої структури. Таким чином, азбест ніби спеціально створений, як основа для фрикційного матеріалу.

Однак у азбесту є і істотний недолік. Він вважається екологічно небезпечним матеріалом. Найтонші моноволокна, потрапляючи в повітря у виді пилу, утворюють стійку суспензію, яка дуже повільно осідає. Потрапляючи в легені людей і тварин, волокна вражають органи дихання, викликаючи особливе захворювання - азбестоз. Уражені ділянки легенів можуть стати центрами утворення ракових клітин. У багатьох країнах вже заборонено використання азбесту в будівництві, електротехніці та інших галузях. Такі ж тенденції спостерігаються і в виробництві гальмівних матеріалів, але знайти ефективну заміну азбесту поки не вдалося. Є спроби замінити азбест волокнами зі скла, базальту, шлаку, бору, вуглецю, але ці матеріали не дають такий же ефект, як азбест. Зокрема, немає такого матеріалу, який так само, як азбест, очищав би поверхню металевого контртіла і при цьому поглинав і пов'язував продукти зношування, не кажучи про інші якості. Тому азбест поки зберігає заслужене лідерство серед компонентів фрикційних матеріалів.

Наповнювачами азбестових матеріалів служать залізний сурик, баритовий концентрат, окисли хрому та інших металів. Додаються також порошкоподібний кокс, графіт, технічний вуглець. Для підвищення теплопровідності вводяться порошки та стружка з міді, латуні, цинку, алюмінію, заліза і т.д.

Сполучними є натуральні і штучні каучуки і смоли, а також їх комбінації. Використовуються бутадієнові, бутадієн-гіррільні, бутадієн-метил-вінілпірідінові, стиролові і інші синтетичні каучуки. У якості смол використовують фенолформальдегідні, анілінфенолформальдегідні, кремнійорганичні, епоксидні компаунди і ін. Одночасно вводяться вулканізатори і затверджувачі.

Вироби на каучуковій основі мають досить високий

коефіцієнтом тертя і зносостійкість. Однак при підвищенні температури понад 200-250° С вони помітно знижуються.

Вироби на смоляній основі мають більшу теплостійкість, але нестабільний коефіцієнт тертя, крихкість. Тому найкращий результат досягається при спільному використанні смол і каучуків. Невдале поєднання сполук через нестабільність коефіцієнта тертя призводить до виникнення автофрикційних коливань (скрип і вереск гальм).

Фрикційні муфти і гальма є вельми відповідальними вузлами, оскільки визначають безпеку експлуатації транспортних засобів, тому при їх розробці проводиться досить точний і детальний розрахунок. Виготовляються дослідні зразки, які проходять спочатку лабораторні, потім стендові і натурні випробування. Особливо ретельно відпрацьовуються нові гальмівні матеріали, що піддаються тривалим випробуванням за спеціальними методиками.

За способом виготовлення фрикційні матеріали на полімерній основі діляться на чотири групи: формовані (пресовані) матеріали (колодки, накладки, сектори, пластини, вкладиші); вальцьовані (стрічки і накладки); ткані (стрічки, накладки); картонно-латексні (накладки). Номенклатура і характеристики фрикційних і антифрикційних матеріалів дуже велика і міститься в довідковій літературі.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛИТЕРАТУРА

1. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн. / Под ред. И.В. Крагельского. - М.: Машиностроение, кн.1, 1978. – 400 с.
2. Журавлев В.Н., Николаева О.И. Машиностроительные стали. Справочник. - М.: Машиностроение, 1981. – 391 с.
3. Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Гинзбург А.Г., Игнатъева З.В. Расчет, испытание и подбор фрикционных пар. - М.: Наука, 1979, 268 с.