

## СУЧАСНІ АНТИФРИКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

Олександр Добровольський<sup>1</sup>, Валерій Косенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури,  
Воздухофлотський проспект, 31, Київ, Україна, e-mail: dobrovolsky34@ukr.net  
<sup>2</sup>Університет "Україна", вул. Львівська, 23, Київ, Україна, e-mail: Kosenko&ramler.ru

## MODERN ANTIFRIKTION MATERIAS

Alexander Dobrovolsky<sup>1</sup>, Valeriy Kosenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kyiv National University of Construction and Architecture,  
03680, Povitroflotsky Avenue 31, Kyiv, Ukraine, e-mail: dobrovolsky34@ukr.net  
<sup>2</sup>University "Ukraine", 03115, vul. Lvivska, 23, Kyiv, Ukraine, e-mail: Kosenko&ramler.ru

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

**Ключові слова:** зносостійкість, антифрикційні матеріали, тертя та зношування.

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

**Ключевые слова:** износостойкость, антифрикционные материалы, трение и износ.

**ABSTRACT. Purpous.** The results of studies of the characteristics of modern anti-friction materials. **Methodology/approach.** The results obtained by analysis of publications in the technical literature. **Finding.** The characteristics of the modern anti-friction materials with special tribological properties, including anti-friction materials based on tin, lead, copper-based, aluminum-based, zinc-based, iron-based, nickel-based and cobalt-based refractory metals and compounds as well as anti-friction nanomaterials, intended for the manufacture of machinery parts, working in conditions of friction and wear. **Research limitations/implications.** Show the application of anti-friction materials, depending on the conditions ekspluatatsii. **Originaliti/volue.** New wear-resistant materials should be more widely application.

**Keywords:** wear-resistant, anti-friction materials, friction and wear.

## ВСТУП

Значна частина енергетичних витрат виникає через зношування в результаті тертя деталей машин [1...3]. На тертя витрачається 30...40% енергії, що виробляється у світі, а втрати у промисловості внаслідок тертя та зношування машин і механізмів складають 4...5%. Тому впровадження у виробництво цих машин сучасних ефективних антифрикційних матеріалів є актуальною задачею у машинобудуванні.

## МЕТА РОБОТИ

До антифрикційних відносять матеріали, які йдуть на виготовлення різних деталей, що працюють в умовах тертя ковзання. Антифрикційний матеріал повинен володіти низьким коефіцієнтом тертя в кінематич-

ному вузлі, високою зносостійкістю і теплопровідністю, малою схильністю до заїдання (скріплення), хімічною стійкістю до агресивних середовищ, досить високою механічною міцністю, добре припрацьовуватись тощо.

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

Велика розмаїтість конструктивних типів вузлів тертя, а також умов експлуатації вказує на неможливість створити універсальний антифрикційний матеріал, здатний працювати у вузлах тертя різного призначення. Ці обставини привели до необхідності створення найрізноманітніших анти-

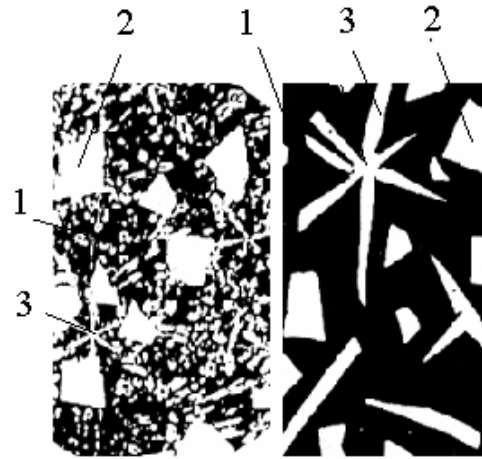
фрикційних матеріалів, характеристики яких із врахуванням умов тертя, надані в цій роботі. Вони можуть бути корисними при конструюванні, виготовленні та експлуатації вузлів тертя машин і механізмів.

### ВИКЛАД МАТЕРІАЛУ

До сучасних антифрикційних матеріалів можуть бути віднесені традиційні метали і сплави, полімери і кераміка, які широко застосовуються у машинобудуванні, а також нові матеріали з особливими триботехнічними властивостями, в тому числі наноматеріали.

*Антифрикційні матеріали на основі олова і свинцю.* Бабіти мають низькі значення твердості (HB270...320 МПа) і температури плавлення (240...320°C), відмінну припрацьовуваність. Бабіти застосовують лише для тонкого (менше 1 мм) покриття робочої поверхні ковзання.

Найпоширенішими бабітами на олов'яній основі є Б93, Б88, Б83, Б83С. Усі вони мають гетерогенну структуру, яка принципово схожа зі структурою бабіту Б83, що зображена на рис. 1. Ця структура становить механічну суміш твердого розчину сурми і міді в олові ( $\alpha$ -фаза), що характеризується пластичністю і невеликою твердістю, твердих кристалів прямокутної форми з'єднання SnSb ( $\beta$ -фаза) та твердих кристалів з'єднання  $Cu_3Sn$  ( $\gamma$ -фаза) у вигляді зірок. При обертанні вала м'яка фаза бабіту зношується скоріше ніж тверді включення, в результаті чого на поверхні бабіта створюються виступи з твердих включень і канавки між ними, які забезпечують гарне змащування пари тертя. У процесі роботи тверді фази бабіту сприймають навантаження і передають його м'якій матриці, яка завдяки високій пластичності набуває форми вала, знижуючи контактний тиск на виступи тертьових поверхонь. Тверді фази, що становлять собою опору для вала, зумовлюють високу зносостійкість. Цьому сприяє також гарні умови для змащування вала.



**Рис.1.** Мікроструктура бабіта Б83 ( ліворуч) і схематичне зображення мікроструктури (праворуч) : 1 -  $\alpha$ -фаза , 2 -  $\beta$ -фаза, 3 -  $\gamma$ -фаза

**Fig.1.** Microstructure babite B83 (left) and schematic representation of the microstructure (right): 1 -  $\alpha$ -phase, 2 -  $\beta$ -phase, 3 -  $\gamma$ -phase

Через високий вміст дорогого олова бабіти використовують для підшипників відповідального призначення (дизелів, парових турбін тощо), що працюють за великих швидкостей і навантажень. Залежно від марки ці сплави можуть працювати при тиску до 1000...2000 Н/см<sup>2</sup>, швидкості ковзання до 50 м/с. і температурі до 70...75 °С.

Дешевшими є бабіти на основі свинцю. До них належать Б16, БКА, БК2, БК2Ш. Принципово ці бабіти мають структуру, схожу із структурою бабітів на основі олова - складаються з пластичної основи і твердих включень, що працюють в як опори для вала.

Бабіт Б16 застосовують в як заміник бабіту Б83 для вкладишів підшипників парових турбін, електродвигунів, які не працюють в умовах ударних навантажень.

В порівнянні з бабітами на основі олова свинцеві більш крихкі і володіють більшим коефіцієнтом тертя. Залежно від марки ці сплави можуть працювати при тиску до 760...1500 Н/см<sup>2</sup>, швидкості ковзання до 30 м/с і температурі до 70 °С.

*Антифрикційні матеріали на основі міді.* До цих матеріалів відносяться бронзи і латуні. Кращі антифрикційні властивості мають олов'яні бронзи (БрОЗЦ7С5Н1, БрОЗЦ12С5, БрОФ 6,5-0,44 та ін.).

З них виготовляють монолітні підшипники. Залежно від марки ці сплави можуть працювати при тиску до  $1000 \text{ Н/см}^2$ , швидкості ковзання до  $3 \dots 12 \text{ м/с}$ .

Застосовують також безолов'яні бронзи (БрСуСФ6-12-0,3, БрСуН6-2 та ін.). У важконавантажених вузлах тертя (дорожніх машин, важкого верстатного устаткування) застосовують високоміцні алюмінієві бронзи (БрА9Мц2, БрА9Ж4).

Як замітники бронз для опор тертя застосовують латуні. Двофазні латуні ЛЦ16Д04, ЛЦ38Мц2С2, ЛЦ40Мц3А та інші застосовують за малих швидкостей ковзання (менше  $1 \dots 2 \text{ м/с}$ ) і невисоких навантажень, їх часто використовують для опор тертя приладів.

Виготовляють також бронзові антифрикційні матеріали порошковим металургійним способом. Поширення набули матеріали на сталевій підкладці з напеченим бронзовим шаром, пориста бронза, просочена мастилом, і бронзографітові матеріали. Виробництво виробів з цих матеріалів у світі досягає  $10^7 \dots 10^8$  штук на день.

Пориста олов'яниста бронза зазвичай містить від 6 до 12% олова. Вона замінює литу бронзу. Пористі бронзи застосовують переважно для виготовлення підшипників ковзання, що працюють у легких умовах, наприклад, для приладів, робота яких характеризується малими швидкостями ковзання (менше  $1,5 \text{ м/с}$ ) і невеликими навантаженнями (приблизно  $0,5 \dots 1,0 \text{ МПа}$ ). Такі підшипники не потребують додаткового змащування протягом  $3000 \dots 5000$  годин, мають низький і стабільний коефіцієнт тертя ( $0,01 \dots 0,04$ ), низький рівень шуму і надійно працюють у діапазоні температур від  $-60$  до  $+120^\circ\text{C}$ . В умовах додаткового змащування граничне навантаження для пористої бронзи досягає  $8 \text{ МПа}$  (якщо  $V=1 \text{ м/с}$ ).

Високі антифрикційні характеристики мають бронзографіти, складнолеговані бронзи та мідеграфіти.

Графіт не взаємодіє ні з міддю, ні з оловом, тому його застосовують як домішку, котра відіграє роль твердого мастила. Графіт вводять в кількості від 1 до 25% залежно від умов роботи матеріалів, наприклад, БрОГр10-3, БрОГр9-3, БрОГр8-4.

Мідеграфітові сплави застосовують переважно для виготовлення нерухомих контактних, радіальних ущільнень і щіток. У цих матеріалах мідь забезпечує провідність, а графіт підвищує зносостійкість і контактний опір. Вміст графіту коливається від кількох до 75%. Для поліпшення властивостей щіткових матеріалів додають олово, свинець, цинк. Зносостійкість спечених мідеграфітових матеріалів в умовах роботи щіток набагато вища порівняно зі звичайними щітковими матеріалами.

*Антифрикційні матеріали на основі алюмінію* (ГОСТ 14113-78). Ці матеріали мають достатню втомну міцність, корозійну стійкість у мастилах, малу схильність до заїдання (скріплення) і високі антифрикційні властивості.

Алюмінієві сплави завдяки своїм специфічним властивостям застосовують замість антифрикційних сплавів на свинцевій і олов'яній основі, а також свинцевої бронзи.

Підшипники у вигляді литих монометалевих втулок виготовляють зі сплавів з підвищеною конструкційною міцністю: АМКО-1, АМКО-3, АМГК-1, АМГК-2, АММГК-1, АММГК-2.

Антифрикційні сплави на основі алюмінію виготовляють також методами порошкової металургії. Вони містять  $10 \dots 60 \%$  пор. Їх просочують мастилом.

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

*Антифрикційні матеріали на основі цинку* (ГОСТ 21437-75). Ці сплави замінюють бабіти і антифрикційні бронзи. Вони мають високу припрацьовуваність і технологічність. Після гарячої обробки тиском ( $250 \dots 300^\circ\text{C}$ ) їх пластичність і міцність підвищуються [2-4].

Антифрикційні матеріалами з цинковою основою (ЦАМ4-1, ЦАМ9-1Д ЦАМ10-5, ЦОС3-3 та ін.) залежно від марки можуть працювати при тиску до  $1000 \dots 2500 \text{ Н/см}^2$ , швидкості ковзання до  $8 \dots 15 \text{ м/с}$  і температурі до  $80 \dots 100^\circ\text{C}$ . Їх переважно застосовують у вузлах тертя залізничного транс-

порту.

*Антифрикційні матеріали на основі заліза.* До цих матеріалів відносять сталі і чавуни [2-5].

Сталі як антифрикційні матеріали застосовують рідко. Зазвичай використовують мідисті сталі, що мають малий вміст вуглецю, або графітовані сталі, що мають вкраплення вільного графіту.

Антифрикційність чавунів (ГОСТ 1585-85) забезпечується наявністю в структурі вільного графіту. Він може бути у вигляді глобул і пластин. Крім графіту, в структурі антифрикційного чавуну має бути вільний ферит (не більше 15%) і не повинно бути вільного цементиту.

Найпоширенішими антифрикційними чавунами є сірий АЧС-1; АЧС-2; АЧС-3; ковкий АЧК-1; високоміцний АЧВ-1.

Залежно від марки антифрикційні чавуни можуть працювати при максимальному тиску від 100 до 3000 Н/см<sup>2</sup> і швидкості ковзання від 0,2 до 8,0 м/с.

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

На основі заліза застосовують такі спечені антифрикційні матеріали: пористе залізо, просочене мастилом, залізо–графіт, залізо–мідь–графіт, сульфидовані залізо–графітові матеріали, матеріали з присадками фторидів кальцію або барію, пористі матеріали, просочені свинцем або легкоплавкими сплавами на основі міді, олова, свинцю та інших присадок, сульфидовані неіржавіючі сталі, складнолеговані пористі матеріали тощо.

*Пористе залізо.* Це найпростіший тип матеріалів, які мають феритну пористу структуру. Пористе залізо у разі рясної подачі мастила зберігає свою працездатність за навантажень 2,0...2,5 МПа і швидкості ковзання 1...2 м/с. Дослідження пористого заліза в більш важких режимах тертя обмежується робочою температурою, що не повинна перевищувати 70...80°С, оскільки

при вищих температурах інтенсивно розвиваються процеси пластичного деформування, розчинення мастила і втрати ефекту самозмащування. Ці матеріали можуть короткочасно працювати при навантаженнях на підшипник до 7...10 МПа та швидкості ковзання до 5 м/с.

Пористе залізо використовують для виготовлення самозмащувальних підшипників ковзання побутової апаратури, приладів, лічильних пристроїв, прядильних кілець тощо.

Залізографіт – найпоширеніший матеріал на основі заліза. Залізографітові матеріали мають перлітно-феритну структуру. Основними матеріалами є ЖГр3, ЖГр4. Найстабільніші фізико-механічні, технологічні властивості та структуру має залізографітовий матеріал, що містить 0,8... 1,0% графіту. Гранична швидкість ковзання для цих матеріалів становить 2...3 м/с, а тривалість роботи не перевищує 3...5 тис. год.

*Композиції залізо–мідь і залізо–мідь–графіт.* Введення міді в порошок матеріал на основі заліза в межах 2,5...20% підвищує його міцність, сприятливо впливає на його змащуваність. Їх застосовують лише при роботі зі змащуванням і рідше в режимі самозмащування. Це матеріали марок ЖДЗ, ЖД5.

Основними марками залізографітів є ЖГр1ДЗ, ЖГр1Д5, ЖГр1, ЖГр4Д7. Значно поліпшує властивості залізографіту введення до його складу міді, що запобігає утворенню цементиту, поліпшує структуру і механічні властивості, підвищує мікротвердість.

Композиції залізо–мідь і залізо–мідь–графіт здатні витримувати статичні навантаження до 60...290 МПа.

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

*Матеріали на залізній основі, що містять сірку, сульфідні і селеніди.* Сірка пози-

тивно впливає на фізико-механічні властивості та структуру залізграфіту й істотно поліпшує експлуатаційні характеристики матеріалів.

Найвищі гранично допустимі навантаження (5...10 МПа) мають матеріали з перлітною і феритно-перлітною структурами, що містять 4...8% Zn і 1...3% графіту з пористістю в межах 15...25%. Одним з найкращих серед них виявився матеріал марки ЖГрЗЦС4.

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

*Матеріали на залізній основі, які містять фториди і хлориди.* Ці матеріали працездатні у разі підвищених навантажень і температур без змащування й у вакуумі. Робоча температура цих матеріалів може досягати 650°C. Кількість фторидів у цих сплавах звичайно складає 5...9%. З метою підвищення міцності сплави легують молібденом, нікелем та іншими компонентами.

*Матеріали на залізній основі, які містять свинець або сплави на основі кольорових металів.* Підвищити міцність й антифрикційні властивості матеріалів на основі заліза можна також додаванням до них свинцю або сплавів на основі кольорових металів.

Для підшипників, які працюють при питомих навантаженнях, більших за 1 МПа, пропонується матеріал, який складається з 60...90% заліза та 10...10% сплаву, що містить 85% Cu, 5% Sb, 5% Pb, 5% Zn.

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

*Антифрикційні матеріали на основі нікелю і кобальту.* Нікель і кобальт мають низькі триботехнічні характеристики, особ-

ливо нікель, оскільки він пластичний і в умовах тертя без змащування скріплюються. Однак спечені композиційні порошкові матеріали на основі нікелю і кобальту за наявності мастильного матеріалу мають високі триботехнічні характеристики, особливо в агресивних середовищах.

Для підвищення антифрикційних властивостей у ці матеріали вводять графіт, фториди кальцію, барію або стронцію. Зношуваність композиційних нікелевих матеріалів, просочених фторидами кальцію або барію, або матеріалів, просочених їх евтектиками, в умовах тертя без змащування становить 10 мкм/км, а коефіцієнт тертя – 0,15...0,25.

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

Антифрикційні матеріали на основі кобальту мають одну відмітну властивість, сутність якої полягає в зменшенні коефіцієнта тертя з підвищенням температури. За кімнатної температури їх коефіцієнт тертя становить 0,32, а 260°C – 0,25, а за 538°C – усього 0,16. Для підвищення працездатності матеріалів на основі кобальту за високих температур до їх складу додають різні тверді мастила в межах 5...20%.

*Антифрикційні матеріали на основі тугоплавких металів і сполук.* Основою в цих матеріалах є *Ti, Ta, W, Mo*, хімічні сполуки *WC, W<sub>2</sub>C, Mo<sub>2</sub>C, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, CrB<sub>x</sub>, SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, BN* або композиції *WC-Ti, WC-TiC-Ta* тощо. Характерними їх властивостями є висока твердість і міцність, які зберігаються за високих температур і швидкостей ковзання, що супроводжуються розігрівом. Просочення їх феросплавами, що містять бор і кремній, підвищує щільність і міцність. Наприклад, композиційні матеріали на основі нітриду кремнію пористістю 20...34% просочують розкиснювальними сплавами. Ці матеріали здатні працювати за високих температур.

Для підшипників ковзання, які працюють в особливих умовах, рекомендовано

матеріали композицій, які місять нітрид бору в кількості від 10 до 20%.

Через невисоку стійкість проти окиснення матеріали на основі карбідів, нітридів, боридів і багатьох інтерметалідів можуть бути використані лише до температури 540°C на повітрі. У вакуумі та захисних газах більшість з цих матеріалів можуть працювати при температурах, більших за 1000°C.

*Антифрикційні матеріали на основі пластмас* [2-4]. Застосовують пластмаси з різними наповнювачами, такими як матеріали органічного (деревне борошно і кришиво, дерев'яний шпон, бавовняні тканини тощо) і неорганічного походження (графіт, тальк, дисульфід молібдену, азбест, скляні нитки, каолін тощо.). Наповнювачі можуть бути листовими, сітчастими, волокнистими, порошковими і газовими.

До основи антифрикційних матеріалів, які застосовуються у вузлах тертя, відносяться поліетилен низького і високого тиску, фторопласт, полістирол, вініпласт, капрон технічний, плексиглас поліформальдегід тощо.

Основними перевагами матеріалів на основі пластмас порівняно з металевими є високе відношення міцності до питомої маси, здатність до гасіння вібрацій, високий опір схоплювання з матеріалом вала, технологічність процесів виготовлення й обробки, низька вартість. Недоліки – низька теплопровідність, гігроскопічність, високий коефіцієнт лінійного розширення, низька механічна міцність. Працездатність і несучу здатність полімерів підвищують за допомогою наповнювачів і армування.

Термопластичні полімери характеризуються низькими значеннями коефіцієнта тертя (0,1 ... 0,3) і гарною зносостійкістю. Ці матеріали застосовуються у вузлах тертя машин і механізмів, що працюють без змащення, а також зі змащенням водою або технологічними рідинами в умовах вібрацій і питомих навантажень. Найкращими антифрикційними властивостями серед них володіє фторопласт, який разом зі сталлю без змащування має коефіцієнт тертя 0,1 і дуже високу зносостійкість. Його недоліком можна вважати надмірну текучість при

навантаженнях. Тому його використовують в складі композиційних матеріалів. Для підвищення зносостійкості і механічної міцності в композиціях на основі фторопласту вводять йодиди металів, бронзи, хлористий натрій, скловолокно. Для матеріалів, що працюють в агресивних середовищах, наповнювачами є карбіди титану, хрому, вольфраму і кремнію. Бувають інші варіанти.

З антифрикційних матеріалів на основі поліформальдегіду з наповнювачами (скловолокно, графіт, сажа, дисульфід молібдену, політетрафторетилен) виготовляють підшипники, зубчасті колеса, муфти зчеплення, шестерні, клапани.

Для виготовлення шестерен, підшипників й інших деталей вузлів тертя застосовують матеріали на основі полікарбонату. Наприклад, матеріал марки ДАК, який містить 15...20% фторопластів і зберігає основні властивості дифлону. При цьому його коефіцієнт тертя по сталі становить 0,15...0,20, а зносостійкість у 30 разів вища.

Матеріали на основі поліакрилатів характеризуються високою термічною стійкістю і морозостійкістю (до -100°C), а також механічною міцністю і зносостійкістю. На їх основі створено антифрикційні матеріали типу АМАН, що мають низький коефіцієнт тертя і високу зносостійкість. Їх працездатність зберігається до температури 300°C. Вони можуть працювати у глибокому вакуумі без змащування, як ущільнювальні матеріали в буровій техніці тощо.

Термореактивні пластмаси отримують на основі епоксидних, поліефірних, поліуретанових, фенолоформальдегідних і кремнійорганічних полімерів.

Задля поліпшення міцнісних і триботехнічних характеристик у фенолоформальдегідні смоли вводять волокнисті й порошкові наповнювачі.

Гарними властивостями серед волокнистих володіють текстоліти, які характеризуються підвищеною ударною в'язкістю, що перевищує 10 кДж/м<sup>2</sup>, а також володіють високою здатністю поглинати вібраційні навантаження. Шестеренчасті текстолітові передачі працюють безшумно при частоті обертання до 30000 об/хв. Тексто-

літові вкладиші працюють у 10 ... 15 разів довше за бронзових. Їх використовують в прокатних станах, турбінах тощо. Гарним мастилом для них є вода.

Для поліпшення самозмащування в умовах тертя без змащування або граничного тертя використовують композиції на основі фенольної смоли, просочені мінеральним мастилом.

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

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

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

Високі антифрикційні властивості для роботи в агресивних середовищах мають високонаповнені епоксидні смоли з графітом і дисульфідом молібдену. Ці композити мають коефіцієнт тертя без мастила 0,15...0,25, з мастилом – 0,05.

*Антифрикційні матеріали на основі вуглецю.* Графіт або матеріали на його основі успішно працюють без змащування в вузлах тертя машин в широкому діапазоні температур, в різних середовищах (в умовах безпосереднього контакту з рідкими і хімічно агресивними середовищами, в середовищі агресивних газів, в умовах вакууму тощо). Працездатність багатьох відомих антифрикційних матеріалів інших класів в зазначених умовах обмежена або повністю виключена. Антифрикційні матеріали на основі вуглецю здатні працювати без змащування в умовах спокійного або плавно змінного навантаження як вкладиші підшипників ковзання, для торцевих ущільнень,

ущільнень по валу і інших елементі тертя.

Для випалених матеріалів АО-600 і АО-1500 (випалені при температурі 1300 °С) рекомендований матеріал контртіла - чавун, хромове покриття. Допустима робоча температура при експлуатації виробів в окислювальному середовищі становить приблизно 350 °С, в відновлювальному та нейтральному середовищах приблизно 1400°C.

Для графітованих матеріалів АГ-600 і АГ-1500 рекомендовано матеріали контр тіла - сталі усіх марок, хромове покриття (гранично допустимий тиск приблизно 10 кгс /см<sup>2</sup>, гранично допустима швидкість 20 ... 25 м/с). Допустима робоча температура при експлуатації виробів з матеріалів АГ-1500 і АГ-600 становить в окислювальному середовищі 400 ... 450 °С; в відновлювальному та нейтральному середовищах – 2300 ... 2500°C.

Випалені і графітовані матеріали мають пористість, що дорівнює 10 ... 15%. З метою підвищення щільності, міцності, зносостійкості і поліпшення інших характеристик вуглецеві матеріали просочують металами. Для просочення застосовують: бабіт Б83, сплав С5 (95% свинцю, 5% олова)..

Матеріали марок АО-600-СО5, АГ-600-Б83 та інші використовуються для виготовлення деталей вузлів тертя, скрізь які при високих тисках не проникають рідина або газ. Вони працюють в умовах сухого, напівсухого і рідинного тертя при спокійному або плавному навантаженні.

Виготовляють також графітофторпластові матеріали. Графітофторпластовий матеріал марки АФГМ використовується для виготовлення поршневих і сальникових ущільнень компресорів, що стискають осушені гази.

Графітофторпластовий матеріал марки ФГ-80ВС використовується для виготовлення поршневих і ущільнювальних кілець компресорів, що стискають вологі гази. Допустима робоча температура при експлуатації виробів з матеріалів АФГМ і ФГ-80ВС становить від - 200 до +250 °С. Коефіцієнт тертя для матеріалів АФГМ і ФГ-80ВС не більше 0,03 при наявності мастила і не більше 0,15 при її відсутності.. Виготовляють також інші марки графітофторпластових матеріалів, такі як 7В-2А, 7В-2А та інші.

*Антифрикційні наноматеріали.* До нано-

матеріалів відносять матеріали, які складаються з об'єктів (частинок) з розміром, меншим за 100 нм хоча б в одному з вимірів. Це тонкодисперсні порошки, волокна і об'ємні наноструктурні матеріали. Їх поділяють на нанофазні і нанокомпозиційні матеріали. До перших відносять матеріали, що складаються з нанорозмірних частинок, а до нанокомпозитів – матеріали, що складаються з матриці, в якій розподілені нанорозмірні частинки. Антифрикційні наноматеріали переважно мають структуру нанокомпозитів.

Якщо до антифрикційного матеріалу додати нанорозмірну домішку іншого матеріалу, то структура цього матеріалу стає більш дисперсною, покращуються його міцнісні і антифрикційні характеристики [7, 8]. Наприклад, було створено матеріал на основі відомого бабіту Б83, до якого було додано в кількості 0,2 ... 0,5 % наноалмазу детонаційного синтезу з частинками розміром в межах 5...150 нм [7]. Структура частинок складалася з двох фаз – графіту і алмазу. Випробування показали, що в порівнянні зі стандартними зразками сплаву Б83 у баббіті, модифікованому наноалмазами, у два рази були покращені зносостійкість і коефіцієнт тертя, скоротився також час припрацювання. Графіт, що входить до складу алмазної шихти детонаційного синтезу, працює як тверде мастило, завдяки чому знижуються сили скріплення і, відповідно, коефіцієнт тертя. Процес тертя стає більш стабільним.

Розроблені технології отримання високо-ефективних вузлів тертя різних діаметрів аж до 2,5 м з антифрикційних вуглепластиків марок УГЕТ, ФУТ-А, ФУТ-Ф для глибоководних апаратів. Вони призначені для роботи за тиску до 60 МПа, швидкості ковзання до 40 м/с і в умовах агресивного мастила або без нього. Ресурс таких вузлів тертя підвищується у 5...10 разів, знижується вібрація, а також не забруднюється зовнішнє середовище.

При виготовленні УГЕТ застосовують вуглецеві волокна, що були отримані при температурах до 1500°C і епоксидна матриця з легуючими елементами, що містять азот і хлор, розміром 30...60 нм і дисперсним середовищем з частинками розміром 1...10 нм. Більш працездатними є вуглепластики марок ФУТ. При їх виготовленні застосовують

фенольну матрицю з ультрадисперсними частинками фторопласту з розміром частинок до 100 нм і багатшарові вуглецеві наноструктури фулероїдного типу з розміром частинок 60...200 нм. Це дає можливість знизити коефіцієнт тертя і лінійну інтенсивність зношування. Вуглепластик марки ФУТ-Ф як модифікатор містить нанофторпластик. Завдяки цьому міцність його в 3...4 рази стає більшою ніж у тих, що описані вище. Він гарно працює при сухому терті і при змащуванні водою, його застосовують в торцевих ущільненнях валів гідротурбін, насосів атомних криголамів та інших судових механізмів.

В статті описані основні сучасні антифрикційні матеріали, що застосовуються у машинобудуванні. Процес їх вдосконалювання триває. Напрямок розвитку наноструктурних матеріалів може бути найбільш перспективним в створенні матеріалів з поліпшеними антифрикційними властивостями.

## ВИСНОВКИ

Неможливо створити універсальний антифрикційний матеріал для роботи в найрізноманітніших умовах, в яких доводиться працювати машинам і механізмам (тертя у вакуумі, тертя зі змащуванням і без змащування, тертя за підвищених температур, високих швидкостей, у різних агресивних середовищах, інертних газах тощо). У зв'язку з цим для кожної окремої конструкції треба підбирати найбільш ефективний матеріал. Тому характеристики сучасних антифрикційних матеріалів із врахуванням умов роботи, що наведені в статті, можуть бути корисними при конструюванні вузлів тертя.



## ЛІТЕРАТУРА

1. *Костецкий Б.И.* Трение, смазка и износ в машинах. – К.: Техника, 1970. – 395 с.
2. Сучасні аспекти трибології у транспортних засобах. Підручник / *Косенко, В.А. Куцевська Н.Ф., Добровольський О.Г., Малишев В.В.* – К.: Університет “Україна”, 2016. – 356 с.
3. *Закалов О.В.* Основи тертя і зношування в машинах. Навчальний посібник / *О.В. Закалов, І.О. Закалов.* – Тернополь: Видавництво ТНТУ ім. І. Пулюя, 2012. – 240 с.
4. *Косенко, В.А. Куцевська Н.Ф., Добровольський О.Г., Малишев В.В.* Матеріалознавство та матеріали у автомобільному транспорті. Навчальний посібник К.: Університет “Україна”, 2016. – 313 с.
5. *Гаркунов Д.Н.* Триботехника. Конструирование, изготовление, эксплуатация машин. - М: Машиностроение, 2002. - 632 с.
6. Наноматериалы детонационного синтеза. Получение и применение / *П.А.Витязь и др., под общ. ред. П.А.Витязя.* – Минск: Беларус. навука. 2013. – 382 с.
7. *Добровольський О.Г.* Конструкційні наноматеріали – новий тип матеріалів з надзвичайними властивостями / *О.Г. Добровольський, Т.А. Людвінська // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини.* Київ. – 2013. – № 81. – С. 65-71.

## REFERENCES

1. *Kostetsky B.I., 1970.* Treniye, smaska i iznos v mashinah [Friction, lubrication and wear in machines]. Kyiv, Teknika. Publ., 395. – (in Russian).
2. *Kosenko V.A, Kusthevska N.V., Dobrovolsky O.G., Malishev V.V., 2016.* Sutshasni aspekti tribologii v transportnih zasobah. Pidrutshnik. Kyiv, Univtrsitet “Ukraina” Publ., 356. – (in Ukrainian).
3. *Zakalov O.V., Zakalov I. O., 2012.* Osnovi tertya i znoshuvannya v mashinah. Navtshalniy posibnik. Ternopol. Publ., TNTU im. Paulya. 356. – (in Ukrainian).
4. *Kosenko V.A., Kusthevska N.V., Dobrovolsky O.G., Malishev V.V. 2016.* Materialosnavstvo ta materialy v avtomobilnomu transporti. Navtshalniy posibnik. Kyiv, Univtrsitet “Ukraina.” Publ., 313. – (in Ukrainian).
5. *Garkunov D.N., 2002.* Tribotehnika. Konstruirovaniye, izgotovleniye, ekspluatatsiya mashin. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 632. – (in Russian).
6. *Vityaz P.A., 2013.* Nanomateriali detonatsionnogo sinteza. Polutseniye i primeneniye. Minsk, Belarus navuka. Publ., 382. – (in Russian).
7. *Dobrovolsky O.G., Ludvinskaya T.A., 2013.* Konstruktsiyni nanomateriali – noviy tip materialiv z nadzvitshaynimi vlastivjstyami [Constructional Nanomaterials – a new type of materials with extraordinary properties]. Girnichi, budivel'ni, dorozhni ta meliorativni mashini [Mining, construction, road and melioration machines], No.81, 73-78. – (in Ukrainian).