

Диха О.В.,***Стебелецька Н.М.,******Динько О.П.****Хмельницький національний університет,
м. Хмельницький, Україна,**Бережанський агротехнічний інститут,
м. Бережани, Україна

E-mail: tribosenator@gmail.com

**КОМПОЗИЦІЙНІ МАСТИЛЬНІ
МАТЕРІАЛИ В ТРИБОСИСТЕМАХ
КОВЗАННЯ МАШИН**

УДК 621.891

В даному дослідженні проведений аналіз результатів досліджень впливу різних антифрикційних і протизношувальних присадок до мастильних матеріалів на трибологічні властивості поверхневих шарів деталей машин. Визначені домінуючі механізми дії присадок по зниженню опору переміщенню та зменшенню зношування поверхонь тертя в процесі контактної взаємодії.

Ключові слова: трибосистеми ковзання, мастильні матеріали, присадки, поверхневий шар, зношування, коефіцієнт тертя

Вступ та постановка завдання

Дія мастильних матеріалів залежить від властивостей трибологічної системи. До цих властивостей відносять: здатність до адсорбції й хемосорбції, корозійна стійкість, здатність до пластичної дії в зоні контакту, мастильна здатність. Крім того, дія мастильних матеріалів залежить від їхніх механічних властивостей (реологічних), хімічних і поверхневих.

Механічні властивості проявляються в обсязі мастильної речовини, і є передачею сил від одного елемента тертьової пари на другий елемент. Особливо виявляється це в сфері змішаного й рідкого тертя. В еластогідродинамічному змащуванні основною ознакою мастильних матеріалів (масел) є в'язкість. Індекс в'язкості інформує про зміни в'язкості залежно від температури. Поверхневі властивості мастильних матеріалів можуть змінювати властивості експлуатаційного верхнього шару. Досягається це, головним чином, через так званий ефект Ребіндера, або явище адсорбційного зниження пластичної межі поверхнього шару речовини під впливом активно-полярних молекул.

Останні дослідження мастильних матеріалів спрямовані на методи хімічного одержання протизношних плівок шляхом використання явища вибіркового переносу матеріалів і застосуванням добавок, здатних до утворення полімерів тертя або комплексних з'єднань. У цьому випадку хімічний механізм мастильних матеріалів не може бути безпосередньо пов'язаний з хімічним складом вихідного базового матеріалу. Мастильний матеріал є тільки носієм хімічних реакцій, а вузол тертя виконує роль "реактора", у якому процеси регулюються не тільки складом мастильної речовини, але й властивостями тертьових поверхонь й умовами тертя.

Ефективність застосування мастильної речовини у вузлі тертя залежить від умов роботи вузла: температури, швидкості ковзання, навантаження і т. і. Мастильні матеріали у вузлах тертя повинні:

- зменшувати опір тертю й інтенсивність зношування рухомих елементів;
- відводити тепло із зони тертя;
- зменшувати коливання викликані процесами тертя;
- відводити продукти зношування із зони тертя.

В даному дослідженні поставлене завдання аналізу результатів досліджень впливу різних антифрикційних і протизношувальних присадок на трибологічні властивості поверхневих шарів деталей машин.

Вплив хімічних елементів у мастильних матеріалах на трибологічні властивості пар тертя

Необхідність дослідження взаємних впливів між складовими базового масла й присадками та матеріалом тертьових поверхонь виникає за різних умов роботи мастильних матеріалів у вузлах тертя. Можна констатувати, що дії присадок залежить від їхнього хімічного складу, а також від будови плівок, що утворюються в області тертя в присутності цих присадок. Найбільш поширеними присадками до мастильних матеріалів, головним чином до масел, є органічні сполуки й композиції, що містять у своєму складі сірку, фосфор, азот і хлор. Існує багато публікацій з досліджень, однак повністю не з'ясовано як склад і будова органічних сполук, що містять вище перераховані елементи, впливає на ефективність їхньої дії, а також якими будуть склад і властивості, утворених при участі цих присадок, плівок на тертьових поверхнях [1, 2 - 3].

Розглянемо вплив присадок, що містять сірку, фосфор, азот і хлор на будову й трибологічні властивості верхнього шару. Окрему групу присадок становлять сірчані з'єднання, де агентом, є сірка як

елемент їхньої будови. Це такі з'єднання як: індивідуальні сірчані з'єднання, сірчані суміші або уведена індивідуально в масло елементарна сірка (до 2 %).

У результаті дії сірки або її з'єднань на суміші органічних сполук утворюються сульфатовані суміші, що застосовуються як присадки до мастильних матеріалів. Використовують сульфатовані жири (рослинне масло), наприклад, сульфатоване сурепне, конопельне, пальмове масло й т.п. Аліфатичні масла, що містять нітросефіри ненасичених жирних кислот, відносно легко зв'язують сірку з ненасиченими зв'язками, утворюючи в цих зв'язках сірчані містки. Крім сульфатованих жирів, насичених і ненасичених жирних кислот одержують також метилові, етилові ефіри цих кислот, які надалі піддаються сульфатації. Окрему групу сірчанних сумішей становлять сульфатовані полімери.

На основі існуючих результатів досліджень можна встановити, що ефірні дисульфідні проявляють кращі протизносні властивості, однак, мають гірші властивості, пов'язані із протизадирністю. Передбачається, що для того щоб поліпшити протизносні властивості органічних сполук сірки необхідно забезпечити на обох кінцях цих часток існування полярних груп, що сильно адсорбують на поверхні металу [4 - 7].

Існує залежність концентрації органічних сполук на їх протизносні властивості. Збільшення зношування й збільшення концентрації присадки в маслі приводить до збільшення корозії. Це пояснюється зміною адсорбції присадки разом зі зміною його концентрації в маслі. Передбачається, що дисульфід адсорбується на поверхні металу спочатку як ефірна група, а потім як група S-S. При маленьких концентраціях присадки на металі обох перерахованих груп утвориться адсорбційна плівка, а зі збільшенням концентрації – така адсорбція буде утруднена. На підставі різних органічних сполук сірки, особливо моно- і дисульфідів, існує механізм протизносної й протизадірної дії цих з'єднань, після якого часточка дисульфиду спочатку адсорбується на поверхні металу, а потім відбувається розрив з'єднань S-S й утворення часточок меркаптида. Ці процеси забезпечують протиизносні дії. При підвищенні навантажень, ріст температури в області тертя приводить до розриву з'єднань S-S у меркаптіди й утворенню неорганічної плівки, що на поверхні містить сірку. Ці процеси спричиняються протизадірною дією присадки. Протизносна ефективність органічних сполук сірки детермінується фізичними властивостями плівок, утворених цими з'єднаннями під час адсорбції на поверхні металу й швидкістю утворення таких плівок. На протизадірну дію мають вплив не тільки плівки сірчастих металів, а й головним чином окису заліза. Встановлено, що кількість O₂ на поверхні сталі, очищеної від окислів зростає разом з дією кисню як у статичному режимі, так і під час тертя. При впливі сірководню на поверхню сталі, на тій же поверхні адсорбувались часточки сірководню, але з відчипленням водню, коли на поверхні сталі залишилася тільки сірка. З'ясовано, що кисень витісняє, сірку з поверхні сталі.

Отже протизадірна ефективність дисульфідів залишається протилежно до їхньої термічної стабільності. Протизносна дія дисульфідів не пов'язана з їхньою термічною стійкістю, при цьому утворюються тонкі плівки, у яких не виявлене Fe і це можуть бути адсорбційні плівки часточок присадки.

У випадку дії ефективних протизадірних присадок на поверхнях тертя з'являється крім дисульфідів заліза Fe також і незначна кількість окислів типу Fe₂O₃ й Fe₃O₄. Встановлено, що швидкість окислювання металу в 50 разів менше швидкості утворення сірчанних з'єднань. Деякі з'єднання, що містять у своєму складі сірку можна зарахувати до багатофункціональних присадок, де прикладом є дисульфід, що виконує протизносну й протизадірну функцію, а також роль інгібітору корозії й окислювання.

Присадки, що містять фосфор це головним чином фосфати. Трибологічні дослідження в цій області ведуться з метою опису протизносних і протизадірних властивостей між такими з'єднаннями як: діалкілфосфатів, а також сумішах цих речовин. Ефективність досліджуваних присадок залежить не від хімічної активності фосфатної кислоти, а від просторової структури вуглеводневих радикалів – чим довше й більше розгалужений радикал, тим більше складною буде адсорбція присадки на металі. За утворення протизносної плівки відповідальним є аніон фосфату. Він реагує з металом й утворює на ньому плівку фосфату металу.

Першим етапом протизносної дії є утворення фосфорних кислот, які після реакції з металом третьової поверхні дають солі, гідроліз солі приводить до покриття металу плівкою неорганічного продукту, що містить фосфор. Діалкілфосфати, що характеризуються найменшою швидкістю адсорбції й хемосорбції забезпечують найбільшу протизносну дію. Протизносна ефективність діалкілфосфатів є тим більше, ніж довше ланцюжок алкілового радикала. При застосуванні масел з поліпшувачими присадками, на поверхнях третьових металів утворюються змішані плівки: органічних і неорганічні типів. Зв'язок між ними залежить від співвідношення навантажень в області контакту під час тертя.

Серед поліпшувачих присадок, що містять азот і додають до мастильних речовин (в основному до мінеральних масел), найбільш типовими є гетероциклічні з'єднання алкілпіридини. Вони підтверджують те, що існує вплив положення алкілової групи в ароматичному кільці алкопіридина на його протизносну ефективність. Узагальнюючи можна визначити, що піридини введені в вуглеводневу суміш проявляють протизносну ефективність, як у повітряному середовищі так й у середовищі інертних газів. Це можна пояснити тим, що піридин має будову шестичленової плоскої молекули, кільце якої склада-

ється з п'яти атомів С и одного атома N. У підсумку можна встановити, що спосіб зв'язування атома N з поверхнею металу є основною фазою протизносної дії присадок, що містять азот.

Хлорові з'єднання як присадки до мастильних речовин утворюють на поверхнях металів міцні й стійкі на розрив хемосорбційні плівки. Однак продукти їхнього розкладання можуть бути причиною корозії, що з'являється в третьовому вузлі. Особливо небезпечними є ті з'єднання, які можуть виділяти хлорводень. Найпоширенішою добавкою із цієї групи є хлорпарафіни, що виходить у результаті пропускання газового хлору через розтоплений парафін.

Металовмісні присадки у мастильних матеріалах

У літературі можна знайти багато досліджень з області застосування порошків металів як добавок у мастильні матеріали. В роботі [10] представлені результати досліджень автомобільного двигуна із застосуванням у мастильній системі високодисперсних частинок колоїдального графіту й деяких металів. Збільшення терміну служби капітально відремонтованого автомобільного двигуна значною мірою залежить від якості припрацювання його на іспитовому стенді. Авторами встановлено, що присадки високодисперсних частинок колоїдного графіту, колоїдних металів до мастил усувають заїдання поверхонь третьових деталей, прискорюють і поліпшують їхній процес припрацювання.

На відміну від загальноприйнятих подань про те, що процес припрацювання складається в остаточному вигладжуванні поверхонь в зібраному вузлі тертя й виправленні всякого роду перекосів й інших похибок, авторами встановлено, що цей процес характеризується заповненням западин мікронерівностей частинками дисперсної фази та вирівнюванням виступів мікронерівностей. Виконані стендові випробування показали, що в результаті припрацювання в присутності металоколоїдних змащень відбувається значно менше збільшення сумарного зазору у вузлах тертя, чим при припрацюванні на звичайних маслах.

Автори публікації [9], які досліджували додавання ЦІАТИМ-201 й Свинцоль-01 констатували, що застосування високодисперсних м'яких металів й їхніх хімічних сполук позитивно впливають на стійкість вузлів тертя в сфері адгезійних впливів і прискорюють їхній процес припрацювання. Додавання Свинцоль-01, створеного на базі свинцю, показало гарну ефективність у трибологічних вузлах. Автор публікації [10] констатує, що із всіх можливих механізмів зчеплення порошку із твердою основою найбільш імовірним є адгезійне зчеплення. Дослідження показали, що зі збільшенням дисперсності порошку процес утворення покриття прискорюється - збільшується площа контактування. Крашу адгезійну здатність проявляли порошки із плоскою формою часток. Причину цього бачать у тім, що виникаючі в таких частках внутрішні напруження після видалення навантаження є меншими, чим у частках іншої форми. У процесі нанесення часток відбувається їхнє збільшення, одні частки зчіплюються з іншими. Наявність середовища до деякої міри знижує інтенсивність зчеплення часток між собою

Автор публікації [10], представив використання для надтонких порошків оксидів міді й цинку дисперсністю 80–100 А, уведених в олеїнову кислоту як присадку до моторного масла. У процесі тертя зразків на маслі із присадкою утвориться абсорбована плівка Cu-Zn, для якої характерні розмита структура й повна відсутність дефектів зразка. За результатами трибологічних випробувань можна зробити висновок, що масло із присадкою володіє не тільки гарними припрацювальними властивостями, але й зберігає стабільність фізико-хімічних властивостей до його повної втрати в процесі обкатування двигуна.

Автори роботи [11] досліджували антифрикційні присадки до моторного масла і довели, що ці присадки полегшують холодний запуск двигуна, знижують температуру й навантаження на пускову систему, а також зменшують зношування деталей двигуна в початковий період роботи.

Особливий вид твердих добавок до рідких і пластичних матеріалів представляють добавки дрібних часток м'яких кольорових металів. Відомий препарат цього типу "Метал-5" (Франція) у вигляді рідкої суміші макроскопічних частинок (0,5–5) мкм міді, цинку, срібла, що перебувають у суспензії в нейтральному маслі. Введення даного препарату в моторні масла забезпечує підвищення компресії двигунів, збільшення розмірів зношених шийок валів, тобто дозволяє провести "ремонт" двигуна без його розбирання.

Автор в роботі [11] встановив, що у випадку, коли в матеріалах третьових пар мідь відсутня, для реалізації режиму вибіркового переносу вона повинна бути уведена в зону тертя зі змащенням у вигляді дрібнодисперсних частинок, окислів, солей або іонів.

Металоплакуючі мастильні матеріали містять металевий порошок чистих металів і сплавів, а також інші мінеральні з'єднання металів або металоорганічні з'єднання. Введення в мастильний матеріал металу у вигляді окислів або солей міді дозволяє одержати більше якісну захисну плівку при менших концентраціях присадки. У цьому випадку плівка на поверхні тертя утвориться в результаті відновлення металу з його з'єднання. Відновлювачами є атоми заліза й вуглецю, що перебувають на поверхні деталі.

Областю застосування дрібнодисперсних порошків металу й оксидів металу є в основному пластичні мастильні матеріали. Висока концентрація, і нерозчинність у вуглеводневих середовищах обмежу-

ють застосування порошків як присадки. В роботах [2, 12] показано, що при введенні в гліцерин або пластичне мастило ЦИАТИМ-201 порошків міді, бронзи або латуні поверхні тертя сталевих деталей покриваються тонкими плівками, що складаються з матеріалу порошків, внесених у змащення. При цьому автори розрізняють два принципи дії порошків. Перший це міцно схоплюватися з поверхнею деталі й реалізувати ефект вибіркового переносу, другий - не схоплюватися з поверхнею, а заповнювати нерівності на поверхні. Перший принцип можна назвати адгезійним, а другий - механічним.

Застосування порошків з використанням механічного принципу відомо давно й має ряд особливостей. При цьому методи використовують порошки, головним чином мідні й свинцеві. Мідний порошок марки отримують електролітичним осадженням із сірчанокислого розчину сульфату міді, а його величина становить 0,1-0,5 μm .

Додавання порошкової суміші в емульсію, застосовувану при різанні металів, дозволяє збільшити швидкість різання й зменшити зношування різального інструменту. До складу суміші входить 70 % міді, близько 30% свинцю, а також добавки телуру, срібла, олова. Серед закордонних публікацій питаннями модифікації мастильних матеріалів із застосуванням частинок металів активно займається дослідницький колектив Політехнічного інституту в Радомі (Польща), що відображено у публікаціях [13 - 17].

Механізми тертя при застосуванні мастильного матеріалу з металовмісними присадками

Результати експериментів підтверджують створення поверхневих шарів за участю порошків металів, що виконують функцію мастильних добавок для мастил. Модифікований верхній шар зменшує коефіцієнт тертя й зношування вузла тертя. У практиці застосовуються наступні порошки: Cu, Al, Pb, Fe та деякі інші.

Незважаючи на ряд робіт, проблема пояснення механізму дії порошків металів у зоні тертя залишається відкритою. За однією з гіпотез вважалося, що сферичні частинки металів відокремлених від поверхні в процесі тертя змінюють характер тертя ковзання контактів вершин нерівності на перекочування за участю третього тіла - сферичних частинок металів. Але ця гіпотеза не знайшла підтвердження в експериментальних роботах, тому що порошки інших форм виконували також функцію мастильних присадок.

Більшість останніх досліджень схиляється до того, що механізм зменшення зношування вузла тертя із застосуванням масла з додаваннями порошків металів, полягає в модифікації верхнього шару в процесі тертя [18, 19].

В роботі [18] встановлено, що найбільше зниження коефіцієнта тертя отримано при найбільшому навантаженні і найбільшій швидкості ковзання. Автори роботи [18] помітили, що разом з ростом за твердіння часток Cu у маслі зростає ефективність змащування, вантажопідйомність мастильного шару й зменшується зношування тертьових елементів. Процес створення шару тертя при цьому має динамічний характер і залежить від ходу процесу тертя. Відповідальним механізмом за зменшення втрат на тертя є модифікація верхнього шару сталевого зразка із вирівнюванням поверхні й зміною хімічного складу верхнього шару. Це продемонстровано на рис. 1, де показана поверхня тертя зразка з додаванням порошку міді і без нього. У процесі тертя порошки Cu підлягали деформації й вбудовуванню у верхній шар.

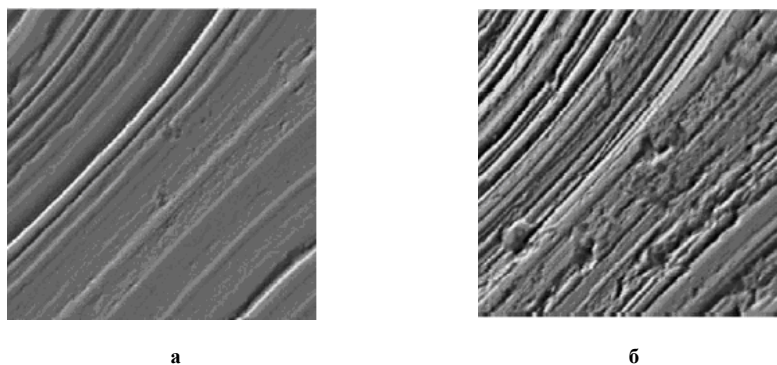


Рис. 1 – Поверхня тертя при змащуванні маслом SAE 30 з додаванням порошку міді й без додавань [18]

Крім вказаного механізму створення шару із низьким тертям автори роботи [19], виявили зміни морфології порошку як результат дії високої температури. Тобто проведені дослідження підтвердили, що в умовах тертя має місце ефект виникнення “ремонтного шару”, пов'язаний з існуванням у зоні тертя температур, що сприяють осадженню частинок міді на поверхнях тертя й зміні їхньої морфології. Ефект зниження зношування в результаті застосування порошків металів помітили також для порошку латуні й цинку [97].

Аналіз результатів впливу присадок до мастильних матеріалів на властивості поверхневого шару

Контакт металу з навколишнім середовищем веде до адсорбції атомів і молекул середовища на поверхню металу. Поверхневий шар металеві деталі завжди несе на себе складну систему адсорбційних шарів. Над ювенільною поверхнею металу є шар його окислів, склад, будова й властивості яких відрізняються від самого металу. Адсорбційні плівки формуються на поверхні металу під дією сил Ван-дер-Ваальса, у результаті взаємодії полярних атомних груп з мастильного матеріалу з активними центрами твердої поверхні.

Однак, такі плівки не можуть нівелювати шорсткість поверхневого шару, висота яких значно більше. У зв'язку із цим, адсорбційні шари, що утворилися на поверхні металу з мастильного матеріалу, відтворюють мікрорельєф поверхневого шару деталей. Властивості адсорбційного шару значно відрізняються від властивостей мастильного матеріалу, що становить об'ємний шар. Молекули, що входять до складу граничного мастильного шару, утворюють на металі міцний і гнучкий ворс, що приймає на себе контактне навантаження, а також має низький опір до дії дотичних напружень. Сформовані адсорбційні шари можуть витримувати більші нормальні навантаження, однак, зі збільшенням температури їхня орієнтація порушується.

Взаємний контакт деталей відбувається на виступах поверхонь, утворених мікронерівностями. Тут розташовуються зони, з яких складається контурна площа контакту. Деформація поверхонь веде до зближення поверхонь, а в міру збільшення навантаження зближення поверхонь зростає й у контакт вступають виступи з меншою висотою. Пластична деформація збільшує фізико-хімічну активність поверхневих шарів, від яких залежать будова й властивості граничних мастильних шарів, а також протікання фізико-хімічних процесів на контакті.

Оксидні плівки захищають поверхневий шар від схоплювання й глибинного виривання і є важливим чинником не тільки в умовах тертя при граничному змашуванні, але й напіврідинному. Більшою міцністю володіють оксидні плівки, твердість яких близька до твердості металу, як, наприклад, у міді й сталі. При механічному впливі на поверхню таких металів плівка, що сформувалася, деформується в місці з підшаром, що при високих навантаженнях захищає її від руйнування. Міцність оксидних плівок знижується зі збільшенням їхньої товщини. Товсті плівки відрізняються підвищеною крихкістю. Властивості оксидних плівок залежать також від мікронерівностей поверхневого шару металу й швидкості окислювання.

Під дією речовин, хімічно активних стосовно металу, на поверхнях тертя утворюються модифіковані шари, що є продуктами взаємодії хімічно активних речовин з металом. У процесі тертя під дією тепловиділення формування таких шарів полегшується. Товщина модифікованих шарів поверхневого шару металу в десятки разів більше товщини адсорбційних шарів.

З метою зниження тертя й підвищення зносостійкості рухливих сполучень машин й устаткування, а також запобігання заїдання в мастильні матеріали вводять присадки.

Досвід застосування традиційних сірко-, фосфор-, хлорвмісних протизносних й антифрикційних присадок показав, що їхня ефективна дія досягається при порівняно високих концентраціях у мастильних матеріалах. Це пов'язане з механізмом дії таких з'єднань, що засновано на їхньому розкладанні в зоні тертя й хімічній взаємодії з металом. Плівки, що утворилися на поверхні тертя металу в результаті взаємодії із присадками, що вводять у мастильні матеріали, виконують таку ж роль, як й оксидні плівки.

При зношуванні металевих пар у мастильних матеріалах із присадками в місцях безпосереднього контакту поверхонь утворюються продукти їхньої взаємодії, які мають малу міцність на зрушення або ж меншу ніж основний метал температуру плавлення, що забезпечує їх антифрикційні й протизносні властивості.

У період експлуатації вузла тертя відбувається безперервні витрати присадки. У процесі роботи рухомих сполучень присадка взаємодіє з поверхневим шаром металу, потім у результаті механічного впливу плівки вторинних структур видаляються із зони контакту, оголюються "ювенільні" поверхні металу, знову відбувається формування захисних плівок й їхнє зношування.

Висновок

В результаті проведеного аналізу літературних джерел встановлений вплив різних антифрикційних і протизношувальних присадок до мастильних матеріалів на трибологічні властивості поверхневих шарів деталей машин. Визначені домінуючі механізми дії присадок по зниженню опору переміщенню та зменшенню зношування поверхонь тертя в процесі контактної взаємодії.

Література

1. Praca zbiorowa po redakcją Zwierzyckiego W. Wybrane zagadnienia zużywania się materiałów w ślizgowych węzłach maszyn. PWN. – Warszawa, 1990. – 310 s.
2. Гаркунов Д. Н. Избирательный перенос в узлах трения / Д. Н. Гаркунов, И. В. Крагельский, А. А. Поляков – М. : Транспорт, 1969, 104 с.
3. Цыпцын В. И. Исследование свойств сверхтонких порошков металлов, добавляемых в смазочные масла для реализации эффекта безызносности при трении. Эффект безызносности и триботехнологии / В. И. Цыпцын, В. В. Стрельцов. – М. : 1994, № 3–4. – С. 39–48.
4. The Load – carrying properties of diester disulphides / E. S. Forbes, K. G. Allum, E. L. Neustadter, A.J. Reid // *Wear* 1970, vol. 15, nr 5.
5. Forbes E. S. The Load – carrying action of organo-sulphur compounds – a review / E. S. Forbes // *Wear* 1970, vol. 15, nr 2.
6. Allum K. G. The Load – carrying mechanism of organic sulphur compounds – application of electron probe microanalysis / K. G. Allum, E. S. Forbes // *ASLE – Transactions*, 1968, vol. 11, nr 2.
- 7.104 Forbes E. S. The effect of chemical structure on the load – carrying properties of amine phosphates / E. S. Forbes, E. L. Neustadter, N. T. Upsdell // *Wear* 1971, vol. 18, nr 4.
8. Применение металлоколлоидных смазок (органозолей железа) для приработки деталей автомобильного двигателя // Сб. Повышение износостойкости и срока службы машин / М. Л. Барабаш, М. В. Коргодский, А. С. Краюшкин, Ф. А. Федотов. – К. : АН УССР, 1960, Т. 2. – С. 249–261.
9. Дякин С. И. Исследования конструкционных и смазочных материалов на трение и изнашивание в тяжело нагруженных шарнирах // Сб. : Долговечность трущихся деталей машин / С. И. Дякин, Т. П. Филатова, В. В. Титов. – М. : Машиностроение, 1988, вып. 3. – С. 144–157.
10. Цыпцын В. И. Исследования свойств сверхтонких порошков металлов, добавленных в смазочные масла для реализации эффекта безызносности при трении. Тезисы доклада 2-го Международного конгресса “Защита-95” / В. И. Цыпцын. – М. : 1995. – С. 180.
11. Прокопенко А. К. Избирательный перенос в узлах трения машин бытового назначения / А. К. Прокопенко. – М. : Легпромбытиздат, 1987, 104 с.
12. Гаркунов Д. Н. Триботехника / Д. Н. Гаркунов. – М. : Машиностроение, 1985, 424 с.
13. Marczak R. Niskotarciowe pokrycia roboczych powierzchni kinematycznych węzłów maszyn. Projekt badawczy nr 7 707091 02 Komitetu Badań Naukowych. Wyższa Szkoła Inżynierska w Radomiu / R. Marczak, R. Makowski. – Radom, 1994. – 245 s.
14. Makowski R. Dyspersje miedzi i innych metali w materiałach smarnych inicjujące niskotarciowe pokrycia roboczych powierzchni kinematycznych węzłów maszyn. Projekt badawczy nr 7 T08C 027 08 Komitetu Badań Naukowych. Politechnika Radomska / R. Makowski. – Radom, 1998. – 113 s.
15. Wagner-Kalotka K. Badanie wpływu cząstek miedzi otrzymanych metodą elektrochemiczną na właściwości tribologiczne środków smarowych. Konferencja XXI SZKOŁA TRIBOLOGICZNA / K. Wagner-Kalotka, R. Makowski, A. Kotnarowski. – Łódź, Arturówek 1996 r. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej Nr 765. – S. 73–79.
16. Маковски Р. О влиянии реакционной способности масел на формирование металлических поверхностей в процессе приработки / Р. Маковски, Р. Домбровски // *Трение и износ*. Т. 11/5, 1990.
17. Makowski R. Badania tribologiczne materiałów kompozytowych w zastosowaniu do pomp łożatkowych. Konferencja “BAŁKANTRIB” / R. Makowski, J.A. Andrejew. – Sofia, 1993. – S. 205–207.
18. Study of friction reduction by nanocopper additives to motor oil / S. Tarasov, A. Kolubaev, S. Belyaev, M. Lerner, F. Tepper // *Wear*. 2002, vol. 252. – S. 63–69.
19. Investigation of the mending effect and mechanism of copper nano-particles on a tribologically stressed surface / G. Liu, X. Li, B. Qin, D. Xing, Y. Guo, R. Fan // *Tribology Letters*. 2004, vol. 17, nr 4. – S. 961–966.

Поступила в редакцію 12.12.2017

Dykha O.V., Stebeletska N.M., Dynko O.P. **Composite lubricants in sliding tribosystems of machines.**

In this study, an analysis of the results of studies on the effects of various antifriction and anti-wear additives on lubricants on the tribological properties of the surface layers of machine parts. The prevailing mechanisms of the action of additives to reduce the resistance to movement and to reduce wear and tear of friction surfaces in the process of contact interaction are determined.

Key words: tribosystem of sliding, lubricants, additives, surface layer, wear, friction coefficient.

References

1. Praca zbiorowa po redakcją Zwierzyckiego W. Wybrane zagadnienia zużywania się materiałów w ślizgowych węzłach maszyn. PWN. Warszawa, 1990. 310 p.
2. Garkunov D. N. Izbiratelnyiy perenos v uzlah treniya. D. N. Garkunov, I. V. Kragelskiy, A. A. Polyakov. M. Transport, 1969, 104 p.
3. TSYiptysin V. I. Issledovanie svoystv sverhtonkih poroshkov metallov, dobavlyaemykh v smazochnyie masla dlya realizatsii efekta bezyiznosnosti pri trenii. Effekt bezyiznosnosti i tribotehnologii. V. I. TSYiptysin, V. V. Streltsov. M. 1994, № 3–4. P. 39–48.
4. The Load – carrying properties of diester disulphides. E. P. Forbes, K. G. Allum, E. L. Neustadter, A.J. Reid. Wear 1970, vol. 15, nr 5.
5. Forbes E. P. The Load – carrying action of organo-sulphur compounds – a review. E. P. Forbes. Wear 1970, vol. 15, nr 2.
6. Allum K. G. The Load – carrying mechanism of organic sulphur compounds – application of electron probe microanalysis. K. G. Allum, E. P. Forbes. ASLE. Transactions, 1968, vol. 11, nr 2.
7. 104 Forbes E. P. The effect of chemical structure on the load – carrying properties of amine phosphates. E. P. Forbes, E. L. Neustadter, N. T. Upsdell. Wear 1971, vol. 18, nr 4.
8. Primenenie metallokolloidnykh smazok (organozoley jeleza) dlya prirabotki detaley avtomobilnogo dvigatelya. Sb. Povyshenie iznosostoykosti i sroka slujbyi mashin. M. L. Barabash, M. V. Koro-godskiy, A. P. Krayushkin, F. A. Fedotov. K. AN USSR, 1960, T. 2. P. 249–261.
9. Dyakin P. I. Issledovaniya konstruktsionnykh i smazochnykh materialov na trenie i iznashivanie v tyajelonaagrujennykh sharnirah. Sb. Dolgovechnost truschihsya detaley mashin. P. I. Dyakin, T. P. Filatova, V. V. Titov. M. Mashinostroenie, 1988, vyip. 3. P. 144–157.
10. TSYiptysin V. I. Issledovaniya svoystv sverhtonkih poroshkov metallov, dobavlenykh v smazochnyie masla dlya realizatsii efekta bezyiznosnosti pri trenii. Tezisyi doklada 2-go Mejdunarodnogo kongressa “Zaschita-95”. V. I. TSYiptysin. M. 1995. P. 180.
11. Prokopenko A. K. Izbiratelnyiy perenos v uzlah treniya mashin byitovogo naznacheniya. A. K. Prokopenko. M. Legprombytizdat, 1987, 104 p.
12. Garkunov D. N. Tribotehnika. D. N. Garkunov. M. Mashinostroenie, 1985, 424 p.
13. Marczak R. Niskotarciowe pokrycia roboczych powierzchni kinematycznych węzłów maszyn. Projekt badawczy nr 7 707091 02 Komitetu Badań Naukowych. Wyższa Szkoła Inżynierska w Radomiu. R. Marczak, R. Makowski. Radom, 1994. 245 p.
14. Makowski R. Dyspersje miedzi i innych metali w materiałach smarnych inicjujące niskotarciowe pokrycia roboczych powierzchni kinematycznych węzłów maszyn. Projekt badawczy nr 7 T08C 027 08 Komitetu Badań Naukowych. Politechnika Radomska. R. Makowski. Radom, 1998. 113 p.
15. Wagner-Kalotka K. Badanie wpływu cząstek miedzi otrzymywanych metodą elektrochemiczną na właściwości tribologiczne środków smarowych. Konferencja XXI SZKOŁA TRIBOLOGICZNA. K. Wagner-Kalotka, R. Makowski, A. Kotnarowski. Łódź, Arturówek 1996 r. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej Nr 765. P. 73–79.
16. Makowski R. O vliyaniy reaktionnoy sposobnosti masel na formirovanie metallicheskih poverhnostey v protsesse prirabotki. R. Makowski, R. Dombrovski. Trenie i iznop. T. 11/5, 1990.
17. Makowski R. Badania tribologiczne materiałów kompozytowych w zastosowaniu do pomp łopatkowych. Konferencja “BAŁKANTRIB”. R. Makowski, J.A. Andrejew. Sofia, 1993. P. 205–207.
18. Study of friction reduction by nanocopper additives to motor oil. P. Tarasov, A. Kolubaev, P. Belyaev, M. Lerner, F. Tepper. Wear. 2002, vol. 252. P. 63–69.
19. Investigation of the mending effect and mechanism of copper nano-particles on a tribologically stressed surface. G. Liu, X. Li, B. Qin, D. Xing, Y. Guo, R. Fan. Tribology Letterp. 2004, vol. 17, nr 4. P. 961–966.