

Лекція 5

ОСОБЛИВОСТІ ТЕРТЯ МАТЕРІАЛІВ ТРИБОСПРЯЖЕНЬ

План

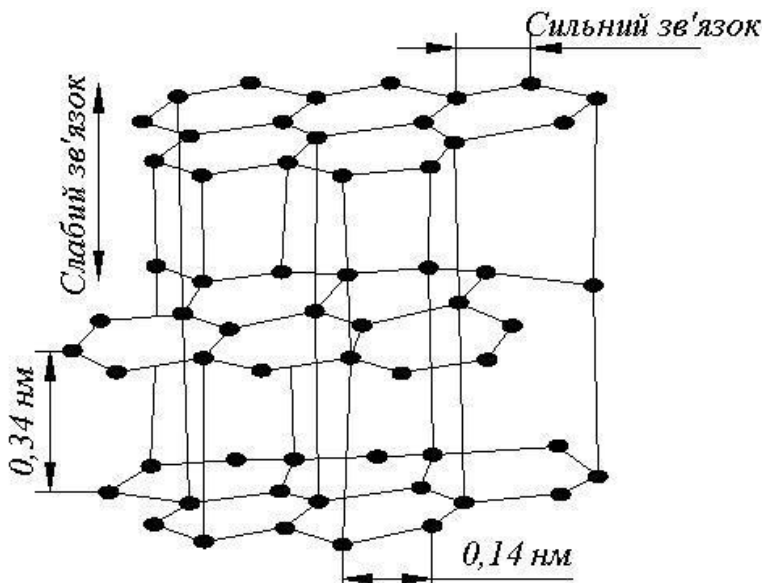
- 5.1. Особливості тертя шаруватих матеріалів
- 5.2. Особливості тертя фторопласту
- 5.3. Тертя і зношування алмазу

5.1. Особливості тертя шаруватих матеріалів

Відомо, що тверді тіла, які мають пластинчасту або шарувату структуру, мають низький коефіцієнт тертя внаслідок явно виражених анізотропних властивостей. Основними матеріалами цієї групи є графіт, дисульфід молібдену, тальк, слюда, нітрид бору.

5.1.1. Особливості тертя графіту

Структура кристалічної ґратки графіту (рис. 5.1) утворена рядом паралельних площин або шарів, які знаходяться один від одного (найближчого) на відстані 0,34 нм. А в кожному шарі атоми вуглецю розміщуються у вершинах правильних шестикутників з довжиною сторони 0,14 нм. Так як сили взаємного притягання між атомами тим менші, чим більша відстань між ними, то зв'язки між атомами в шарах значно міцніші, ніж між шарами. Тому при великому опорі графіту тиск, направлений перпендикулярно шарам (площинам спаювання), а опір зрізу паралельно шарам, малий, і розщеплення завжди відбувається між шарами.



Коефіцієнт тертя сталі по графіту або графіту по сталі дорівнює приблизно 0,1.

Графіт є міцним на стиск (дає малу площу контакту) і слабким на зріз (забезпечує малу міцність на поверхні розділу), тому очевидно, що коефіцієнт тертя на повітрі має малі значення. Якщо з графіту шляхом нагрівання у вакуумі

усунути газ (провести дегазацію графіту) і виміряти після цього коефіцієнт тертя при кімнатній температурі, то його значення будуть у межах 0,5...0,6. Це супроводжується різким підвищенням зношування. Отриманий за рахунок дегазації високий коефіцієнт тертя зменшується з підвищенням температури поверхні (рис. 5.2).

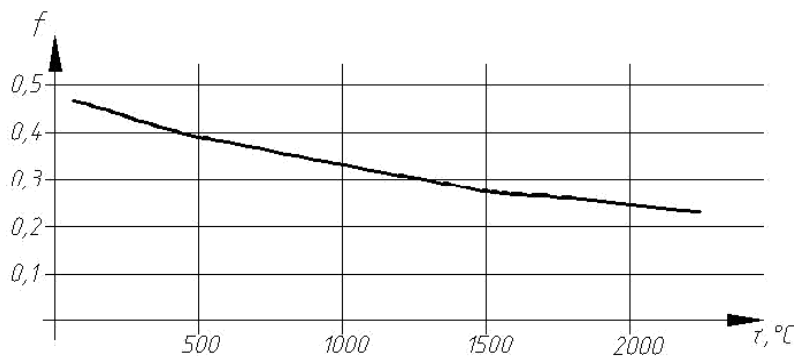


Рисунок 5.2. Залежність коефіцієнта тертя графіту від температури

Якщо отриманий таким чином чистий графіт буде покриватися поверхневими плівками кисню або водяної пари, то тертя і зношування повертаються до низьких значень. Для створення цього ефекту потрібна лише незначна кількість кисню і пари води, і вони покривають тільки краї кристалічної ґратки графіту.

5.1.2. Особливості тертя дисульфід молібдену

Дисульфід молібдену MoS_2 має шарувату молекулярну структуру, яка аналогічна структурі графіту. Окремі шари складаються або з чистого молібдену, або з чистої сірки. Сусідні шари сірки легко розщеплюються, так як міцність зв'язку між ними порівняно низька. Коефіцієнт тертя монокристалів дисульфиду молібдену на повітрі по сталі складає $\sim 0,1$. На відміну від графіту дисульфід молібдену має коефіцієнт тертя у вакуумі, який мало чим відрізняється від коефіцієнта тертя на повітрі, навіть при температурах до $800^\circ C$ (рис. 6.3). Підвищення температури вище $800^\circ C$ є

недоцільним, оскільки в цих умовах дисульфід молібдену практично розкладається.

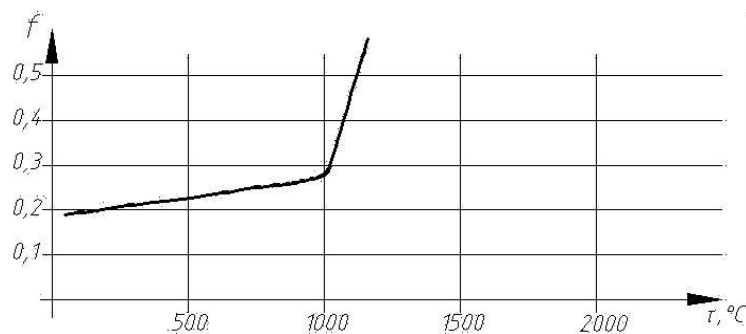


Рисунок 6.3. Залежність коефіцієнта тертя дисульфиду молібдену від температури у вакуумі

Низький коефіцієнт тертя дисульфиду молібдену у вакуумі дозволяє використовувати його в космічній техніці. При використанні MoS_2 не потрібно також газів і пари для збереження змащувальної дії.

Дисульфід молібдену використовується у вигляді порошку, який додається до матеріалу-носія: пластичної суміші, яка складається з 40...70% MoS_2 у напіврідному середовищі, аерозольних дисперсійних брызків.

Другий спосіб використання – введення дисульфиду молібдену до складу деталей із металів, що спікаються. Щітки електродвигуна, виготовлені у складі MoS_2 – срібло, мають інтенсивність зносу на 2...3 порядки меншу, ніж графітові щітки. Наведена на рис. 6.4 діаграма дозволяє порівняти характеристики MoS_2 та інших присадок неполярного мінерального масла при малих швидкостях ковзання.

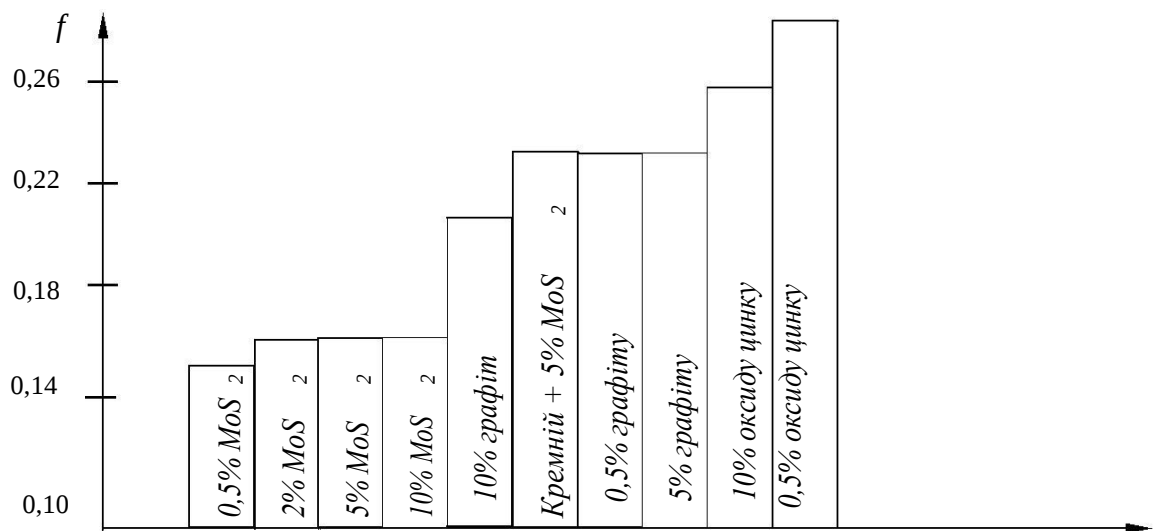


Рисунок 5.4. Порівняння коефіцієнта тертя дисульфиду молібдену та інших присадок до мінерального масла

З трьох твердих присадок MoS_2 , окису цинку і графіту, тільки дисульфід молібдену має здатність пригнічувати стрибкоподібний ріст при терті. Крім того, концентрація графіту вище 5% менш ефективна у зменшенні зносу, ніж концентрація 0,5% MoS_2 . Не дивно, що дисульфід молібдену є в наш час перспективним матеріалом для вузлів тертя і ковзання.

Дисульфід молібдену знаходить широке використання від ефективного змащування в завісах важких дверей до складних систем, які працюють у космосі. Коли перший космічний корабель з астронавтами на борту здійснив посадку на Місяці в 1969 році, фенольна смола з дисульфиду молібдену забезпечила надійність висування його регулюючих опор при температурі $157^{\circ}C$. Як тверде мастило дисульфід молібдену успішно використовується у двигунах внутрішнього згорання, які працюють без мастила, роликів ланцюгових приводів, пресах і вентиляторах маслопроводів. Характеристики MoS_2 перевищують характеристики графіту і фторопласту, і його, окрім традиційного використання (у вигляді порошку, пластичного мастила або дисперсії), можна наносити також плазмовим напиленням.

5.1.3. Особливості тертя слюди

Слюда являє собою широко відомий матеріал з надзвичайно явно вираженими властивостями розщеплення. Площину розщеплення можна розглядати як матрицю з окислу кремнію, в яку вкраплені поляризовані атоми калію. Якщо відбувається розщеплення, то на кожній поверхні залишається приблизно половина атомів калію, а з протилежного боку з'являється відповідне число від'ємних "дір" (рис. 6.5). Поверхнева енергія площини розщеплення слюди приблизно в 20 разів вища, ніж у графіту.



Рисунок 5.5. Схема площини розщеплення слюди

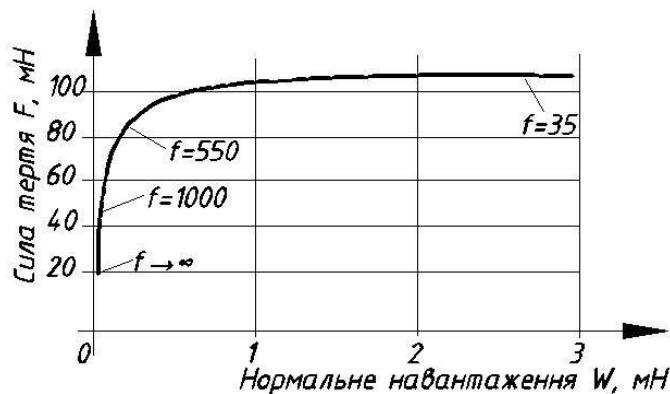


Рисунок 5.6. Залежність коефіцієнта тертя циліндричних поверхонь слюди, що перетинаються, від навантаження

Зі співвідношення між тертям і навантаженням для циліндричних поверхонь слюди бачимо, що закон Кулона-Амонтона не виконується. Процес ковзання є перервним і супроводжується відриванням невеликих "фрагментів" у вигляді лусочок від поверхні слюди (рис. 6.6). Це вказує на дуже сильну адгезію, яку можна зменшити добавкою тальку на поверхні ковзання. Це призводить до зниження коефіцієнта тертя f до значення 0,1.

5.1.4. Особливості тертя нітриду бору

Структура шаруватого нітриду бору на молекулярному рівні нагадує структуру графіту, однак природні шари мають два різних елементи. Площини розшарування графіту складаються з атомів вуглецю, а дисульфиду молібдену – тільки із сірки. У випадку нітриду бору вони мають бор і азот. Типові значення коефіцієнта тертя на повітрі складає 0,2-0,4.

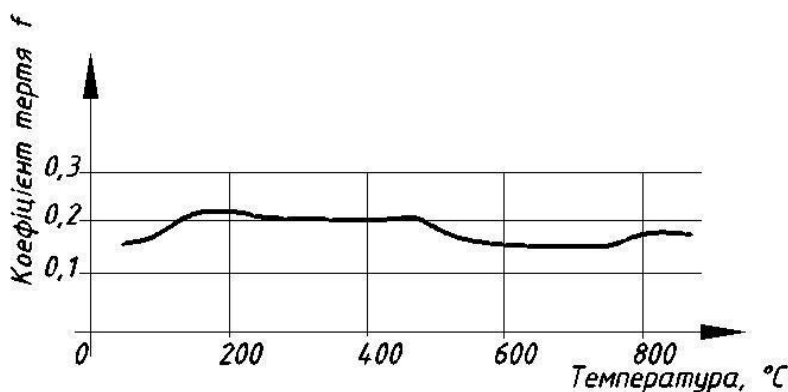


Рисунок 5.7. Залежність коефіцієнта тертя на повітрі від температури для поверхні пластини з нанесеними шарами нітриду бору і графіту

В умовах вакууму, зміна коефіцієнта тертя нітриду бору f від температури дуже близька до зміни цього коефіцієнта для дегазованого графіту (рис.5.7). Відомо, що графітні плівки забезпечують добре змащування на повітрі до 500°C, а нітрит бору – в інтервалі температур 500...900°C. Таким чином, плівка суміші графіту і нітриду бору забезпечує ефективне змащування до 900°C.

5.2. Особливості тертя фторопласту

Фторопласт, або політетрафторетилен (ПТФЕ) відомий як порівняно твердий пластичний матеріал з незвичайно низьким коефіцієнтом тертя. В таблиці 6.1 наведено порівняння деяких фізико-механічних характеристик різних полімерів, включаючи фторопласт, і діапазон їх коефіцієнтів тертя. Крім того, в більшості випадків вказаний крайовий кут (який пов'язаний з поверхневою енергією та адгезією), який вимірюється шляхом нанесення краплі води на досліджувану поверхню (рис.6.8).

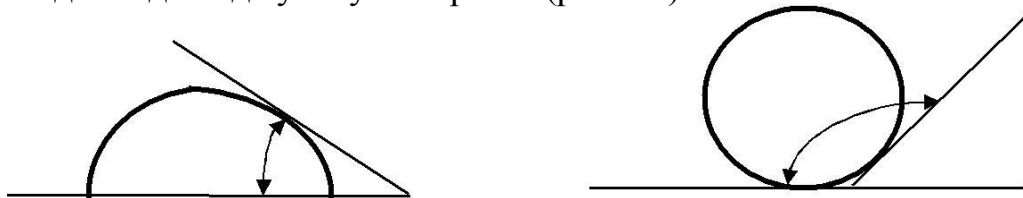


Рисунок 5.8. Крайовий кут

Таблиця 5.1

Властивості полімерів

Полімер	Звичайна назва	Об'ємна границя текучості p , МПа	Об'ємна міцність на зріз, МПа	Поверхнева міцність на зріз s , МПа	Коефіцієнт тертя	Граничний кут, град.
Полівінілхлорид	ПВХ	150	50	70	0,4-0,5	-
Полістирол	Полістирол	200	40	80	0,4-0,5	-
Поліетилметакрилат	Оргскло	200	60	100	0,4-0,5	0
Нейлон 66	Нейлон	100	60	50	0,3	0
Поліетилен	Поліетилен	20	14	10	0,6-0,8	89
Політетрафторетилен	Фторопласт, тефлон, ПТФЕ	20	20	4	0,05-0,1	126

З таблиці бачимо, що ПТФЕ є унікальним матеріалом, який має особливо низький коефіцієнт тертя (0,05...0,1). Коефіцієнт тертя залишається низьким у всіх випадках, крім температур, близьких до температури 320°C. За низьких температур (–40°C) коефіцієнт тертя підвищується до 0,15.

Не зважаючи на досить мале тертя фторопласту до температури 300°C, він має чотири основних недоліки як матеріал для підшипників: недостатню механічну міцність, погану теплопровідність, високий коефіцієнт теплового розширення і зростання коефіцієнта тертя f до 0,3 при високих швидкостях.

Відповідно, якщо фторопласт використовувати безпосередньо як матеріал підшипника, то він буде нагріватися, розширюватися і заїдати. Тому ПТФЕ вводять у поверхню пористого матеріалу (наприклад, спеченої міді). Таким чином, отримують матеріал, який має об'ємно-механічні і теплові властивості міді, а на поверхні – фрикційні властивості фторопласту.

Для забезпечення довговічності і малого коефіцієнта тертя фторопласту рекомендується широко використовувати наповнювачі. Як наповнювач, як правило, використовують мідь, бронзу або скловолокно (15...20%). Додаючи дисульфід молібдену (5...15%) до армованого скловолокном фторопласту, отримують близький до оптимального за характеристиками тертя матеріал для підшипників сепараторів. Чистий фторопласт без домішок використовують у випадках, коли можна уникнути сильного фрикційного нагріву, наприклад, у направляючих машинах, простих механічних вузлах і т.п. При цих обмеженнях його характеристики близькі до характеристик дисульфиду молібдену. Однак, в умовах вакууму, ні один із відомих матеріалів не може за характеристиками зрівнятися з дисульфідом молібдену.

5.3. Тертя і зношування алмазу

Алмаз є найтвердішим із відомих матеріалів. Він проорює і дряпає інші тверді матеріали й кераміку і не піддається залишковій деформації. Елементарна комірка кристалічної ґратки алмазу утворена атомами вуглецю і має не більше $\sim 0,1...1\%$ домішок.

На рис. 6.9 наведено залежність коефіцієнта тертя алмазного щупа по косому січенню алмазу від нормального навантаження. Крива 2 характеризує тертя алмазу на повітрі, причому, можна відзначити чотири характерних особливості: малий коефіцієнт тертя ($f=0,05$); тертя практично однакове, якщо алмазні поверхні очищені й знежирені або покриті мінеральним маслом чи жирною кислотою; коефіцієнт тертя зростає при зменшенні навантаження; тертя залежить від навантаження.

Старанне очищення поверхонь алмазу можливе лише при нагріванні до 700°C у глибокому вакуумі. Крива 1 на рис. 6.9 показує, що після такого очищення спостерігається різке зростання коефіцієнта тертя.

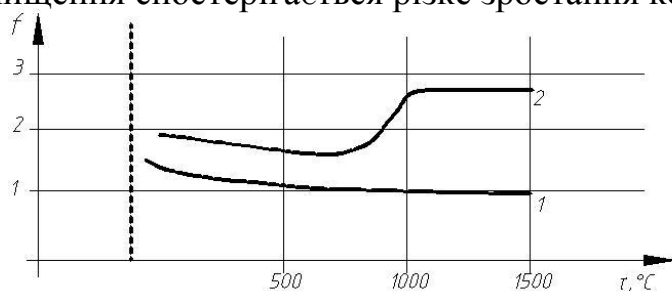


Рисунок 5.9. Тертя алмазу по металу після очищення у вакуумі: I – на повітрі (при кімнатній температурі); II – у вакуумі: 1 – алмаз–платина; 2 – алмаз–мідь

коефіцієнт тертя алмазу більший для металів з вищими температурами плавлення.

Як бачимо з рис. 5.9, коефіцієнт тертя алмазу по чистій платині у вакуумі дуже великий – 2...3 навіть при кімнатній температурі, для пар ковзання алмаз–метал – 0,4...0,6 при кімнатній температурі на повітрі і 1...3 – у вакуумі. Як наведено в таблиці 6.2,

Таблиця 5.2

Тертя і знос алмазу при ковзанні металів

Поверхня металу	Температура плавлення, С	Знос алмазу, нг/км	Коефіцієнт тертя, (100-200 м/с)
Мідь	1083	1-2	0,05
Підшипникова сталь	1500	30-60	0,08
Хром	1615	200-500	0,10