

ФУНКЦІОНАЛЬНЕ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.891:681.6-633

Ю. І. Андрусишин, Г.О. Сіренко

Структура, властивості та технологія твердих мастильних матеріалів (огляд)

Тверді мастильні матеріали у вигляді порошків або спечених брикетів, суспензій, паст, покриттів набули за останні 40-50 років неабиякого значення, як одне із розв'язків актуальної проблеми змащування вузлів тертя за екстремальних умов, зокрема: за високих питомих навантажень, високих зсувних зусиль та контактних температур, стійкості до хемічно і корозійно агресивних середовищ.

Ключові слова: шаруваті тверді мастильні матеріали, графіт, дисульфід молібдена, нітрид бора, дителургійні диселеніди металів, згура, кокс, вуглецеві волокна

Стаття постуила до редакції 05.01.2020; прийнята до друку 15.01.2020

Вступ

Термін «тверді мастила» включає в себе досить широке коло різноманітних твердих речовин неорганічного та органічного походження, що забезпечують змащування поверхонь динамічного контакту твердих тіл, тобто запобігають процесам схоплювання, заїдання нано і мікрошорстких поверхонь, зменшення коефіцієнта тертя та зношування поверхонь. Тверді мастила можуть використовуватись у вигляді порошку, твердого покриття тощо [1].

1. Перевага твердих мастил полягає в тому, що у порівнянні зі рідкими мастилами, у пластичному стані вони є більш стабільними та надійними за важких умов експлуатації у вакуумі, в агресивних рідких та газових середовищах, за високих температур та швидкостях ковзання, значних питомих навантажень тощо.

Тверді мастильні матеріали виконують свої функції матриці з метою попередження безпосереднього трибологічного контакту та локалізації зсувних деформацій у шарі твердого мастильного матеріалу, що забезпечує зниження енергетичних витрат у процесі тертя та зношування, оскільки опір ковзанню у цих шарах істотно нижчий, ніж у матричному чи в композиційному матеріалі.

Важливою перевагою твердих мастильних матеріалів перед іншими видами мастил є зменшення зносу трибосистем машин і механізмів при їх запуску і зупинці, а також під час можливого виникнення ефекту "оливого

голодування" (наприклад, при запуску у вакуумі, в умовах низьких температур).

Головним чинником забезпечення змащувальної дії в контакті твердих тіл є формування плівки з малим опором зсуву. При цьому шорсткі поверхні твердих тіл сприймають механічне навантаження на невеликій частці номінальної площі і контакту, а зсув реалізується в плівці, тому опір ковзанню в цих умовах набагато нижче, ніж у випадку відсутності плівки в зоні контакту.

2. Плівка твёрдозмащувальної речовини, крім антифрикційної дії, має, також протизносні властивості. Оскільки в її присутності знижується ймовірність розриву когезійних зв'язків між нано- та мікрошорстких виступів поверхонь контактуючих тіл, знижується і ймовірність зношування контактуючих тіл. Важливо, що наявність твердого змащувального матеріалу на контактних поверхнях твердих тіл зменшує і можливість появи між ними твердих часток зношування, що мають абразивну дію. Перелічені чинники призводять в результаті до зниження інтенсивності адгезійного і абразивного зношування[2].

3. Тверді мастильні матеріали доцільно застосовувати за умов, коли рідкі і пластичні мастила стають мало ефективними. Так, існують тверді мастила, які ефективні при екстремально високих навантаженнях (навіть до навантажень, що викликають руйнування контактуючих поверхонь), дуже високому вакуумі або в інертній атмосфері переміщення (застосування твердих мастил в атмосферних

умовах наведено на рис. 1 [3], екстремально високих і низьких (до криогенних) температурах, при роботі у глибокому вакуумі (у тому числі космічному), в умовах ядерної радіації, у рідкому кисні та різних агресивних середовищах.

При цьому тверді мастила ефективно змащують неметалічні пари тертя (скло, кераміку, полімерні композиційні матеріали) і не забруднюють навколишнє середовище.

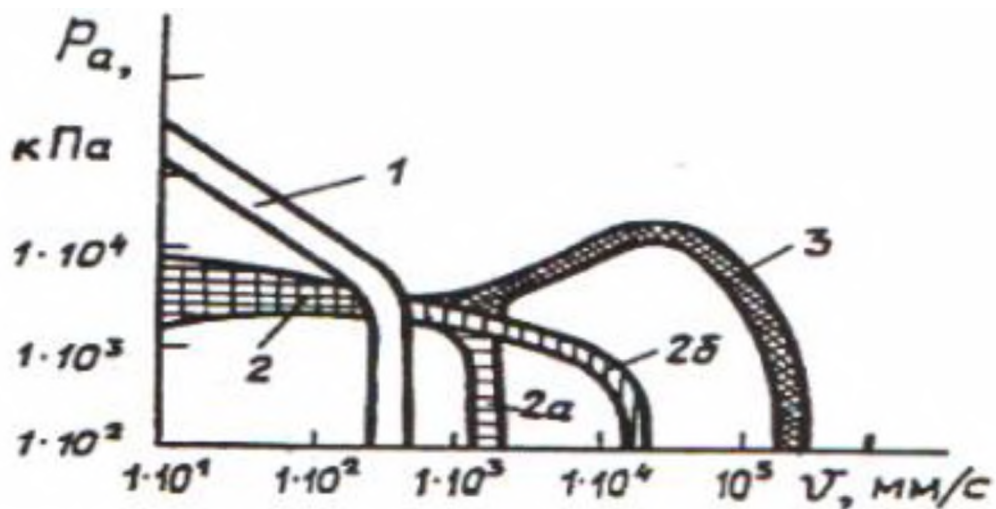


Рис. 1. Узагальнена залежність максимального значення швидкостей (v) відносного переміщення контактних поверхонь і нормального тиску (P_a) при наявності на контактних поверхнях: 1 – твердого мастила; 2а, 2б – пластичних мастил; 3- рідкої оливи [3].

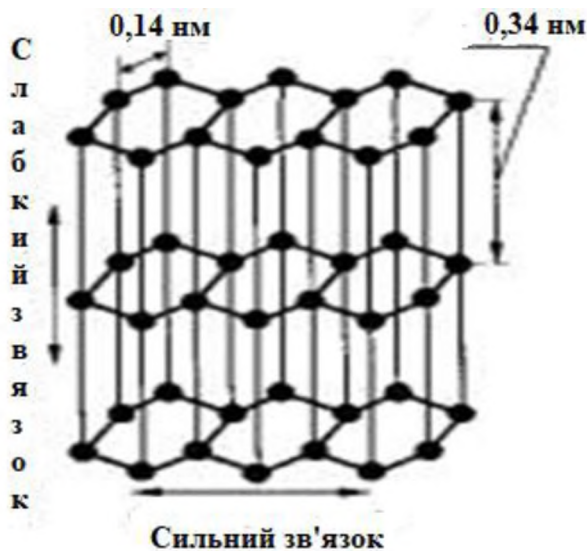


Рис. 2. Схема кристалічних ґрат графіту [9]

Тверді мастила мають двовимірну, трьохвимірну кристалічну або аморфну будову, а речовини з подібною будовою мають неоднакові фізико-механічні властивості за всіма напрямками, тобто вони анізотропні за напрямками. Вказані властивості кристалічних речовин визначаються, в першу чергу, величиною сил взаємодії та енергією зв'язку. Так, збільшення енергії зв'язку, зазвичай,

супроводжується зростанням твердості, міцності і температури топлення. Відомо, що анізотропність кристалів проявляється в тому, що по деяким площинам кристал може бути легше розколотий [4-6].

Тверді мастильні матеріали (ТММ) можуть також не належати ні до одного із первнів або структурних елементів пар тертя (наприклад, у вигляді порошку), можуть входити

як наповнювач композиційного матеріалу або покриття одного або двох частин трибосистеми. Крім того, можна виділити суміші ТММ з сполученими, які полегшують їх нанесення на робочу поверхню, і нові антифрикційні мастила, головними представниками яких є металографічні матеріали.

4.Недоліком твердих мастильних матеріалів є більш низьке відведення енергії тертя у формі тепла від поверхонь, а також відносно низький термін експлуатації [7].

5. До найпоширеніших твердих мастил у автотракторному та сільськогосподарському машинобудуванні відносять графіти, нітрид бору, дисульфід молібдену, політетрафторетилен.

Блок термінів «тверді мастильні матеріали» розподілено на:

1) тверді неорганічні мастильні матеріали (цей термін застосовують до таких матеріалів, як графіт, дисульфід молібдену, диселенід молібдену, тальк, нітрид бору тощо);

2) тверді органічні мастильні матеріали (цей термін застосовують до твердих олів, мил, восків, пігментів тощо);

3) м'які метали: цина, оливо, цинк, індій, барій, мідь та стопи на його основі (мосяж, спиж);

4) полімерні мастильні матеріали:

поліетилен, флюорвмісні полімери (політетрафлюоретилен), поліамід, поліпропілен тощо;

5) хемічні та гальванохемічні покриття : сульфідні, фосфатні, оксидні [5-7].

5.1 У табл. 1. приведені показники щільності, коефіцієнта тертя і гранично допустима температура експлуатації твердих мастильних матеріалів (сульфідів, селенідів і телуридів металів) [8].

5.2.Графіт є найбільш сталою кристалічною модифікацією вуглецю з яскраво вираженою шаруватою структурою (рис. 2) [9].

У гексагональних кристалічних ґратках графіту розташовані атоми карбону, які зв'язані уздовж ліній шестикутників ковалентними зв'язками. Зв'язки між кристалічними площинами, відстані між якими здійснюються за рахунок слабких Вандервальсових сил, енергія яких на 3..4 порядки нижче, ніж у ковалентних зв'язках. Тому, зсувна міцність графіту в напрямках, рівнобіжним заповненими атомами Карбону кристалічним площинам, набагато менша, ніж у напрямках, що відповідають розриву ковалентних зв'язків [9].

Характеристика твердих мастильних матеріалів [8]

Таблиця 1.

Сполука	Кристалічна ґратка	Щільність, г/см ³	Коефіцієнт тертя	Гранично допустима температура експлуатації, К
BiS ₃	Ромбічна	7,40	0,07...0,14	773
CuS	Гексагональна	4,28	0,17...0,41	793
Cu ₂ S	Гексагональна	5,60	0,18	723
MoS ₂	Гексагональна	4,80 - 5,16	0,02...0,30	1373
NbS	Моноклинна	5,90 - 6,00	0,04	1573
PbS	Кубічна	7,50 - 7,59	0,37	683
TaS ₂	Гексагональна	7,16	0,06	1773
WS ₂	Гексагональна	7,50 - 7,63	0,03...0,16	1673
NbSe ₂	Гексагональна	6,25	0,06...0,17	1623
TaSe ₂	Гексагональна	–	0,08	1173
MoSe ₂	Гексагональна	6,90	0,03...0,22	1623
WSe ₂	Гексагональна	9,00	0,02...0,18	1623
MoTe ₂	Гексагональна	7,80	0,10...0,34	1528
WTe ₂	Ромбічна	9,44	0,27...0,49	1293

Величина енергії зв'язку між структурними шарами графіту залежить від адсорбції сторонніх речовин. Пара води, кисень, вуглеводні, FeCl_2 , FeCl_3 проникаючи в міжплощинні простори графіту, збільшують відстань між його шарами й знижують, тим самим, енергію зв'язку між ними. Тому, мастильні властивості графіту слабо виявляються у вакуумі і при температурі більш 473 К [10-12].

Найбільш сприятливі мастильні властивості графіту виявляються в присутності вологи. Ефект мастильної дії графіту визначається тим, що молекули води, що утримуються в повітрі, сорбуються в міжплощинних проміжках і ще більше послаблюють міжплощинні зв'язки. Під час втрати адсорбційних шарів води у вакуумі або внаслідок нагрівання або зниження атмосферного тиску антифрикційні властивості графіту погіршуються. При відсутності вологи коефіцієнт тертя поверхонь, розділених графітовим прошарком, досягає 0,3, у той час, як при наявності сорбованої вологи або інших речовин він складає приблизно 0,05. Ця обставина обмежує використання графітів. Однак у загальному машинобудуванні графіти знайшли широке застосування для мащення сухих нарізних сполучень, канатів і як добавку в трансмісійні оливи тощо [13].

Висока змащувальна властивість графітів за нормальних умов забезпечується завдяки здатності міцно зчіплюватися з поверхнею чавуну, криці, хрому та інших конструкційних матеріалів. За високих температур поява оксидного шару на поверхні графіту може поліпшувати його мастильні властивості. Цьому сприяє міцний зв'язок графітових плівок з оксидами металів, які беруть участь у терті та зношуванні. Високі мастильні властивості графітів виявляються під час змащення крицевих та мідних поверхонь, схильних до окиснення. З підвищенням температури міцність і модуль пружності графітів зростають. Тому, графіти не лише є термостійкими матеріалами та теплостійкими, а й не схильні до повзучості під час сильного нагрівання. Графіти мають високу температуру топлення (3273 К), високу електропровідність, пластичним графіт стає при температурі 2273 К. Тому, графіт є добрим високотемпературним мастилом й дуже ефективний для використання в щітках та інших ковзких електроконтактах. Необхідно відзначити також такі властивості графітів, як малу хімічну активність, стійкість до дії більшості кислот і лугів, практичну інертність до радіоактивного випромінювання [14-19].

Графіт надійно використовується як у складі компонента різних антифрикційних матеріалів: чавуна, композицій на полімерній основі, графітовмісних змащувальних матеріалів тощо .

6. Нітрид бору в модифікації, близький до графітів, має також гексагональну структуру з відстанню між атомами в площині базису , рівним 0,25 нм, між площинами базису – 0,5 нм [20].

На відміну від графіту площини спайності нітриду бора складаються з різних атомів (бор і нітроген). Механізм дії нітриду бора при терті та зношуванні твердих тіл схожий з графітами, однак значення коефіцієнта тертя більш високі. Це ймовірно пов'язано з підвищеною (у порівнянні з графітом) міцністю між поверхнями кристалітів. У високотемпературних умовах роботи трібосистеми (до 1173 К) високі результати дає використання суміші графіту з нітридом бора. Графітні плівки забезпечують мащення до температури 773 К, а нітрид бора – в інтервалі температур 773 – 1173 К. Трибологічні характеристики графіту і нітриду бора наведені в таблиці 2 [21].

Нітриду бора забезпечує низький коефіцієнт тертя (0,15 при 873 К) в умовах високих температур [22].

7. Високі трибологічні властивості мас також дисульфід молибдену MoS_2 – природний мінерал (молибденіт), можливе також використання синтетичного дисульфиду молибдену.

Дисульфід молибдену (MoS_2), як і графіт має шарувату гексагональну кристалічну структуру (рис 3.) [23]

Шари сульфуру, які утворюють поверхні кристала MoS_2 , забезпечують сильну адгезію до поверхні металу. Крім того, змащувальна дія дисульфиду молибдену так само, як і графіту, заснована на його кристалічній структурі з дуже малою поверхневою енергією базисних площин. Відстань між атомами сульфуру, що знаходяться в різноманітних шарах кристалу, значно більша, ніж відстань між шарами. Тому, слабкі зв'язки між шарами сульфуру забезпечують вільне переміщення шарів відносно один одного. З другого боку, всередині шару діють сильні ковалентні зв'язки між Мо і S, забезпечуючи високу міцність базисних шарів. Вказана анізотропія (розщеплення шарів у певній площині) у будові кристалічної решітки MoS_2 виражена тим сильніше, чим чистіша речовина. Тому найбільш ефективно мастильні властивості MoS_2 виявляються в умовах вакууму. На відміну від графіту, при наявності води коефіцієнт тертя MoS_2 та спрацьовування збільшуються.

Дисульфід молибдену може сприймати статичні навантаження до $3 \cdot 10^3$ МПа і динамічні - до 10^1 МПа, тобто він практично працездатний до тисків, рівних границі текучості багатьох металів. Для підвищення довговічності антифрикційних покриттів на основі дисульфиду молибдену до нього додають сульфіди, селеніди і

телуриди деяких металів у якості модифікаторів. [24-28]

Вважаю також перспективним використання MoS_2 разом з графітом у різних пропорціях у залежності від вимог до ТММ.

До недоліків дисульфиду молібдену слід віднести те, що він легко окислюється. При підвищених температурах MoS_2 окислюється до триоксиду молібдену, що негативно впливає на мастильні властивості й адгезію дисульфиду молібдену до поверхні металу.

Дисульфід молібдену найбільш ефективний у різноманітних вузлах тертя ковзання (шарніри, важелі, шлицьові та різьбові з'єднання, ланцюгові та зубчасті передачі та ін.) [29].

Перевагами графіту і дисульфиду молібдену є те, що вони часто зустрічаються в Природі у вигляді мінералів, що добуваються промисловими способами.

8. Серед інших твердих мастил слід відмітити такі матеріали, які мають шарову структуру, зокрема: тетраборат натрія ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), йодид свинцю (PbI_2), а також інші сульфідні та селенідні важких металів: MoSe_2 , WS_2 , NbS_2 , NbSe_2 . У більшості випадків вони виявляють високу антиокисну і хімічну стабільність, електропровідність. Вони використовуються у вигляді порошків, суспензій та антифрикційних лакових покриттів. За умов глибокого вакууму WS_2 за стандартної температури знижує значення коефіцієнта тертя аналогічно MoS_2 і досягає значення 0,065. Фторований графіт, який використовують у вигляді високодисперсного порошку або у вигляді поліамідного лакового

покриття, виявляє кращі змащувальні властивості, ніж власне сам графіт [30-35].

Основні фізико – хімічні властивості твердих мастильних матеріалів наведені в таблиці 3 [35].

9. Графен був названий «королем нових матеріалів», оскільки він має кращу електричну провідність і теплопровідність з найтоншою товщиною і максимальною інтенсивністю. Крім того, мастильна промисловість демонструє великий ринковий потенціал графену. Зараз спостерігається процес дослідження властивостей графену, тому що як тверде мастило графен малодосліджений.

Графен модифікованого твердого мастила не тільки в практиці дисперсійної стабільності складу, а й його мастильних матеріалів, але також встановив стандартну і оціночну систему для визначення його добавок [36]. Конкретні мастильні матеріали, модифіковані графеном, показали значне поліпшення в відношенні опору і зниження тертя при екстремальному тиску. Це забезпечує новий прорив для рішень довготривалих рецесивних проблем, таких як тертя і зношування головних компонентів при жорстких умовах експлуатації. LiuGong має намір створити 3 види матеріалів для Графен-модифікованого мастила і домогтися застосування їх в продуктах CE LiuGong. Ці наміри також включають запуск корелятивних продуктів і деталей. Ґрунтуючись на нових продуктах і технологіях, розроблених на основі графена, вартість промислової продукції LiuGong Lubricants Company, ймовірно, збільшиться на 20%.

Таблиця 2

Характеристики графіту і нітриду бора [21]

Матеріал	Коефіцієнт тертя		Вакуум, Па
	на повітрі	у вакуумі	
Графіт:			
природний	0,19	0,44	$6 \cdot 10^{-7}$
піролітичний	0,18	0,50	$6 \cdot 10^{-7}$
Нітрид бора	0,25	0,70	$2 \cdot 10^{-7}$

10. В якості протекторних механічних мастил широко використовують безперервні полімерні покриття із термопластичних і терморезистивних полімерів. До полімерів, що використовують в якості ТММ, відносять поліетилен, нейлон, капрон і політетрафторетилен.

Політетрафторетилен (ПТФЕ) являє собою термопластичний матеріал, який має унікальні антифрикційні властивості. Молекули цього полімеру являють собою міцні вуглецеві ланцюги з елементарним кільцем у вигляді $-\text{CF}_2-$ з надзвичайно слабкими міжмолекулярними зв'язками. ПТФЕ створює поверхню з дуже малою

енергією, що забезпечує ефективну змащувальну дію. Висока хемічна інертність полімеру та його нездатність сорбувати вологу дозволяють використовувати ПТФЕ у найрізноманітніших умовах, включаючи вакуум, різні газові середовища, підвищені та низькі температури. Можливості ПТФЕ розширені із-за широкого варіювання його кристалічності.

В процесі тертя та зношування [32-40] молекули ПТФЕ переносяться на відповідну контактну поверхню і орієнтуються в напрямку ковзання. При помірних навантаженнях і швидкостях ПТФЕ перевищує усі ТММ, однак в умовах підвищених навантажень і швидкостей

зношування і тертя цього полімерного покриття різко збільшується. Крім того, ПТФЕ має низьку теплопровідність, малу механічну міцність,

великий коефіцієнт лінійного розширення і незначну адгезію до покритої поверхні [38].

Таблиця 3. [35]

Фізико-механічні властивості шаруватих твердих мастильних матеріалів

Показники	Тверді мастила						
	графіт	BN	MoS ₂	MoSe ₂	WSe ₂	WS ₂	NbSe ₂
d, нм	0,246	0,252	0,316	0,3288	0,3290	0,3187	0,3439
c, нм	0,675	0,669	1,232	1,290	1,297	1,2525	2,5188
c/d	2,74	2,66	3,90	3,92	3,94	3,9	7,32
густина, кг/м ³	1400- -1700	2250	4800	6900	9220	7400	6250
тердість за Моосом (спресовані зразки)	1-1,5	1-2	1-2	1-2	1	1	1
модуль пружності під час стискання, МПа	5050	2280	8500	–	–	–	–
температура окиснення на повітрі, К	728	1073- -1173	673	673	623	783	623
температура розкладу у вакуумі, К	–	–	1373	1623	1623	1673	1623
температура топлення, К	3925	3273	1458	1473	1473	–	1073
електропровідність	висока	низька	напівпровідник				висока

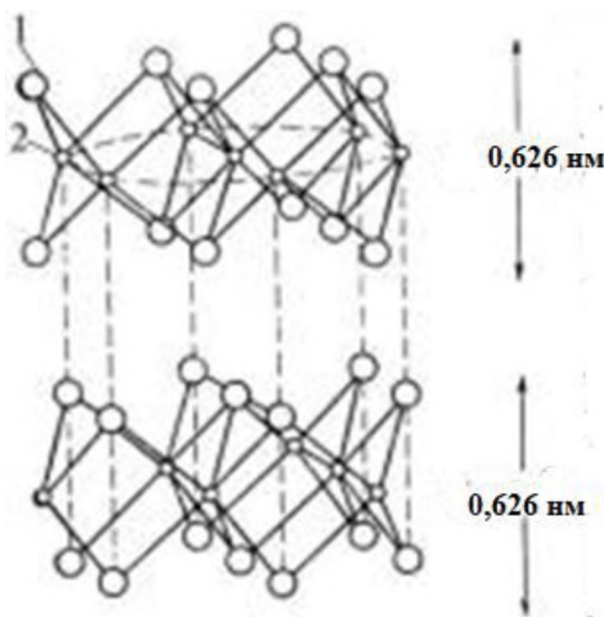


Рис. 3. Кристалічна гексагональна структура дисульфиду молибдену: 1 – молибден; 2 – сульфур [23].

11. Ефективність використання твердих мастильних матеріалів залежить від конструкції

трибосистеми, підготовки її поверхні контакту й способу нанесення на поверхні[39]. Тверді

мастильні матеріали наносять: у порошковидній формі, у вигляді суспензії, пасти, лакових покриттів, металевої плівки з м'якого металу й хемічних покриттів із солей металів. Тверді мастильні матеріали можуть бути використані також як домішки, які суттєво підвищують ефективність рідких олив і пластичних мастил. Суспензії з твердими мастильними матеріалами можна вводити в моторні, трансмісійні, гідравлічні оливи й мастильноохолоджувальні технологічні засоби (рідини) для поліпшення їх антифрикційних властивостей під час механічної обробки металів[40].

Висновки:

1. Хімічна модифікація поверхонь твердих мастил дає очікування від таких комплексних і модифікованих структур твердих мастил нових трибологічних властивостей.
2. Покращення антифрикційних властивостей графіту можна досягти завдяки

вкоріненню між шарами солей, металів, халькогенідів металів і додавання вуглецевих волокон.

3. Дисульфід молібдену ефективно працює у дуже жорстких умовах: агресивному середовищі, вакуумі, радіації, надвисоких або наднизьких температурах тощо.

4. Стабільність трибохарактеристик у широкому інтервалі зовнішніх впливів дозволяє рекомендувати MoSe_2 і WSe_2 , які отримані обробкою металів у парах Se, для вузлів тертя різного призначення.

5. Нітрид бору забезпечує адекватне змащування за температур вищих за температури окиснення на повітрі графіту і MoS_2 , тому його пропонується використовувати як високотемпературне мастило.

6. Графен перебуває на стадії дослідження як твердий мастильний матеріал.

Використані джерела інформації

1. Сиренко Г.А. Антифрикционные карбопластики. – Київ: Техніка, 1985. – 196 с.
2. Сиренко Г.А. Антифрикционные термостойкие полимеры / Г.А. Сиренко, В.П. Свидерский, В.Д. Герасимов, В.З. Никонов. – Київ: Техніка, 1978. – 246 с.
3. Сич А.М., Нагорний П.Г. Основи матеріалознавства. Ч.І. Хімія твердого тіла: Навч. посібник. – 2-ге вид. [Ред. О.В. Литвинова]. – Київ: Укр. фітосоціологічний центр, 2008. – 164 с.
4. Сич А.М., Нагорний П.Г., Павленко В.О. Основи матеріалознавства. Ч.ІІ. Функціональні неорганічні матеріали: Навч. посібник [Ред. О.В. Литвинова]. – Київ: Укр. фітосоціологічний центр, 2006. – 184 с.
5. Сіренко Г.О., Кириченко В.І., Кузипин О.В. Властивості мастильних наноплівочок під час надвисоких тисків: Монографія. [За ред. Г.О. Сіренка]. – Івано-Франківськ: Прив. підпр. Петраш К.Т., 2015. – 336 с. 500 1
6. Сіренко Г.О., Свідерський В.П., Базюк Л.В. Теплофізичні властивості металів та сплавів: Монографія [За ред. Г.О. Сіренка]. – Івано-Франківськ: Вид. Супрун В.П., 2015. – 230 с.
7. Сіренко Г.О., Свідерський В.П. Теплофізичні властивості полімерних композитів [За ред. Г.О. Сіренка]. – Івано-Франківськ: Вид. Супрун В.П., 2016. – 292 с.
8. Химические и физические свойства углерода [Под ред. Ф. Уокера]. – Москва: Мир, 1969. – 367 с.
9. Кириченко В.І., Сіренко Г.О., Кириченко В.В. Сучасні паливномастильні матеріали: стан та поступ розвитку. Ч.2. Мастильні матеріали: Монографія. [За ред. Г.О. Сіренка]. – Івано-Франківськ: Вид. Супрун В.П., 2017. – 288 с.
10. Сулима І.В., Сіренко Г.О. Тверді мастильні матеріали (огляд). - Вісник Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника. Серія Хімія. Випуск XX (2016), - С. 4-18
11. Васильев Ю.Н., Исследование влияния адсорбции на смазывающую способность графита и проблема создания высокотемпературных антифрикционных графитовых материалов: автореф. доктор. дис. - Физико-химич. ин-т им. Л.Я. Карпова, Москва, 1975.
12. Материалы будущего: Перспективные материалы для народного хозяйства [Под ред. А. Неймана] / Пер. с нем. А.Г. Екимова, Н.А. Катуркина, В.В. Михайлова; под ред. В.Н. Красовского. – Ленинград: Химия, 1985. – 240 с.
13. Сіренко Г.О., Кириченко В. І., Сулима І. В. Фізико –хімія паливно-мастильних матеріалів [Монографічний підручник (спеціальний курс лекцій)]/ За ред. Сіренка/ Прикарп. нац.ун-т ім. В. Стефаника. – Івано-Франківськ : Вид. Супрун В. П., 2017. – 508 с.
14. Борик В. В. Кристалохімія точкових дефектів та їх комплексів і термоелектричні властивості на основі PbTe , SnTe , GeTe // Автореф. Дис. к. х. н. за спец. 02.00.21. – хімія твердого тіла. – Івано-Франківськ : Прикарп. нац. ун-т, 2010.- 24 с.
15. Сіренко Г.О. Створення антифрикційних композитних матеріалів на основі порошків – термостійких полімерів та вуглецевих волокон// Дисерт. д. т. н. за спеціальністю 05.16.06 – порошкова металургія та композиційні матеріали. – Київ: Ін-т проблем матеріалознавства НАНУ, 1997. – 537 с.
16. Вайштгейт В. Э., Трояновская Г.И. Сухие смазки и самосмазывающиеся материалы. – Москва: Машиностроение, 1968. – 180 с.
17. Уббеллоде А. Р., Льюис Ф. А. Графит и его кристаллические соединения/ Пер. с англ. под ред. Е. С. Головиной, О. А. Цихоновой. – Москва : Мир 1965. – 256 с.

18. Воронков Б. Д. Подшипники сухого трения. – Ленинград: Машиностроение, 1968. – 140 с.
19. Брейтуэйт Е. Р. Твердые смазочные материалы і антифракционные покрытия/ Пер. з англ. С. Д. Ключенева/ Под ред. В. В. Сеницына. – Москва: Химия, 1967. – 320 с.
20. Шулупов С. В. Физика углеродистых материалов. – Москва: Металлургия, 1972. – 255 с.
21. Веселовский В. С. Угольные и графитовые конструкционные материалы. – Москва: Наука, 1966. – 227 с.
22. Каррол – Порчинський Ц. Материали будущего: Термостойкие и жаростойкие волокна и волокнистые материалы / Под ред. Н. В. Михайлова. – Москва: Химия, 1966. – 239 с.
23. Пластические смазки и твердосмазочные покрытия // Труды ВНИИ НП. – Москва: Химия, 1969. – 288 с.
24. Наполнители для полимерных композиционных материалов: Справочное пособие/ Пер. с англ. С.В. Бухарова, С. Г. Кулик, Г. П. Чалых, В. Г. Шевченко/ Под ред. П. Г. Бабаевского. – Москва: Химия, 1981. – 736 с.
25. Изготовление и эксплуатация деталей из новых антифрикционных углеродистых материалов, работающих без смазки// Обзор по международной тематике. - №3/ 42-70/ Состав. Д. Н. Фельдман, Р. И. Дубровский. – Москва: ГОСТ НТИ, 1970. – 38 с.
26. Свойства и применение антифрикционных самосмазывающихся материалов// Сб. трудов ЦНИИ информации и технико- эконом. исслед. в цвет. металлургии/ Под ред. Л. Б. Христановой, В. Д. Белогорского. – Москва: Минцветмет, 1970. – 146 с.
27. Конструкционные углеродистые материалы в цветной металлургии: Каталог – справочник/ Под ред. В. П. Соседова, Т. А. Соккера. – Москва: ЦНИИ информации и технико-эконом. исслед. в цветной металлургии, 1970.- 73 с.
28. Чегодаев Д. Д., Наумова З. К., Дунаевская Ц. С. Фторопласты, / Под ред. Л. В. Черешкевича. – 2-е изд., доп. – Ленинград: Госхимиздат, 1960. – 192 с.
29. Паншин Ю. А., Малкевич С. Г., Дунаевская Ц. С. Фторопласты. – Ленинград: Химия, 1978. – 231 с.
30. Сіренко Г. О., Солтис Л. М., Сулима І. В. Фізико-хімія поверхні вуглецевих твердих мастил// Тези допов. ІХ Укр. наук. конф. Студентів, аспірантів, молодих вчених. – Вінниця, 29 – 30.03.2016. – 159 с.
31. Складанок М. Б., Сіренко Г. О., Солтис Л. М. Створення присадок на основі лігандів комплексних сполук купрум (II) та їх антифракційні властивості// Матеріали X міжнар. конф. «Розвиток наукових досліджень 2014». – Полтава: 24 – 26.11.2014. – Полтава: «Інфорграфіка», 2014.- с.88-90.
32. Крагельский Н. В. и др. Трение и износ в вакууме/ И. В. Крагельский, Н. М. Любарский, А. А. Гусяков и др. – Москва: Машиностроение, 1973. – 216 с.
33. Вольченко А. И. и др. Трибология, электротермомеханические основы, анализ и синтез на микро-, микро- и милли-уровнях и технические приложения: Учебник/ А. И. Вольченко, М. В. Киндрачук, Д. А. Вольченко и др. / Под ред. А. И. Вольченко. – Київ – Краснодар: Нац. авиац. ун-т (Київ), 2015. – 371 с.
34. Алисин В. А. и др. Трение, изнашивание и смазка: Справочник: в 2 –х книгах. Кн. 1/ В. А. Алисин, А. Я. Алябьев, А. М. Архаров и др. / Под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. – Москва: Машиностроение, 1978.- 400 с.
35. Боуден Ф. П., Тейбор Д. Трение и смазка твёрдых тел. Ч II. / Пер. с англ. Н. М. Михина, А. А. Силина/ Под ред. И. В. Крагельского. – Москва: Машиностроение, 1968. – 544 с.
36. Гаркунов Д. Н. Триботехника. – Москва: Машиностроение, 1985. – 421 с.
37. Польшер Г., Майсснер. Основы трения и изнашивания/ Пер. с нем. О. Н. Озерского, В. И. Пальянова/ Под ред. М. Н. Добичена. – Москва: Машиностроение, 1984. - 264 с.
38. Крагельский И. В. Трение и износ. – изд 2-е, перероб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1968. – 480 с.
39. Костецкий Б. И. Трение, смазка и износ в машинах. – Київ: Техніка, 1970. - 396 с.
40. Киндрачук М. В. и др. Трибология: Підручник/ М. В. Киндрачук, В. Ф. Лабунець, М. І. Пашенко, С. В. Корбут. – Київ: Вид. Нац. авиац. ун-ту «НАУ –друк». – 2009. - 392 с.