

Г.О. Сіренко¹, Л.М. Солтис¹, М.Б. Складанюк¹, Н.І. Сабадах¹, В.П. Свідерський²,
Л.М. Кириченко², Р.В. Ільницький¹

Антифрикційні властивості пластичних мастил, наповнених ламінарними сполуками графіту, які інтеркальовані FeCl₃ та покриті Cu⁰-Cu₂O-CuO або Cu⁰-Cu₂O

¹Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76025, Україна

Тел. (0342) 77.64.15; (096) 813.93.53, e-mail: sirenkog@rambler.ru

²Хмельницький національний університет,

вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, 29016, Україна

Вивчені антифрикційні протизадірні та протизносні властивості пластичних мастил на основі мінеральної оливи та синтетичних рідин (полігліколя, етеру двоосновної органічної кислоти, триатомного спирту, перфторполіетеру), наповнених порошками інтеркальованих сполук графіту C_x(FeCl₃) без та з мідним покриттям складу Cu⁰-Cu₂O-CuO (за формальдегідною технологією) та Cu⁰-Cu₂O (за цинковою технологією).

Ключові слова: антифрикційний матеріал, мастило, графіт, інтеркаляція, міднення.

Стаття постуила до редакції 01.07.2010; прийнята до друку 15.09.2010.

Вступ

1. Для збільшення довговічності і надійності, підвищення працездатності та експлуатаційної ефективності механізмів, машин та обладнання використовують пластичні мастильні матеріали, які здатні знижувати зношування поверхонь під час тертя та зношування і попереджувати їх пошкодження в результаті виникнення заїдання [1]. Для покращення мастильної здатності пластичних мастил до них додають різні порошки твердих наповнювачів, що забезпечують ті або ті функціональні властивості змащувачого матеріалу (антифрикційні, протизносні, протизадірні тощо) [2].

Структура і механічні властивості наповнювача у значній мірі визначають експлуатаційне значення пластичних мастил [3]. До твердих порошкових наповнювачів пластичних мастил висувають наступні вимоги: висока змащувача здатність, антифрикційна стійкість, висока адгезія до металевої поверхні і добра змочуваність дисперсійним середовищем, високий ступінь дисперсності частинок, вузький фракційний склад (0,1 – 10 мкм), висока хімічна, гідролітична і термічна стабільність тощо. Таким вимогам задовільняють тверді мастильні матеріали: графіти, сульфіді, селеніди, телуриди Мо, Са, W, Nb, Sb, Pb, Ag, Ti, йодиди Bi, Cd, Pb, Ag, нітрид бору тощо [4–10].

2. При розробці нових мастильних композицій необхідно враховувати, що, створюючи сполуки графіту, або інших шаруватих твердих тіл,

відкривається можливість регулювання структури та активності наповнювача. Реальний (природний або штучний) графіт не утворює ідеальної графітової структури, правильна орієнтація шарів в тривимірному просторі відносно один одного відсутня. Цей графіт містить у різних співвідношеннях графітову, турбостратну структури та аморфний вуглець, при цьому графітова структура складається у більшій частині з гексагональної, ніж ромбічної [7]. Структура графіту дефектна. Дефекти проявляються у вигляді блоків мозаїки, у порушенні закономірностей чергування гексагональних шарів (дефекти пакування шарів) та зв'язків вуглецевої сітки [4]. Окрім непаралельності шарів, дефектність паковки виявляється у неупорядкованості, що властива великим молекулам (за [4] макромолекула турбостратного вуглецю має близько 600, а макромолекула графітованого вуглецю – біля 1000 конденсованих гексагонів), кінцевості та обриванні гексагональних сіток і їх криволінійності [7, 8]. Дефекти у зв'язках виявляються у вигляді вакансій в окремих вузлах вуглецевої ґратки, зміщення атомів вуглецю з вузла ґратки у міжвузля, включення в ароматичну структуру аліциклічної групи атомів тощо [4, 8]. Скупчення вакансій в графіті приводить до виникнення «діркових» і «клішевих» дефектів, завдяки яким виникають гвинтові дислокації [4, 7]. Можливості знаходження у різних валентних станах приводить до дефектів ізомерних зв'язків: окремі атоми вуглецю знаходяться в sp³-гібридації, а не в основній

sp²-гібридації [4, 7]. Ненасиченість крайових атомів приводить до взаємодії їх з «гостивими» атомами з утворенням кисневих і вуглеводневих комплексів тощо [7].

Така структура графіту приводить до того, що у вуглецеву ґратку (у вакансії вузлів і між площинами) можуть вкорінюватися інородні атоми, йони і цілі молекули (O, S, Se, N, P, B, галогени, метали, неорганічні кислоти і солі та органічні сполуки [4, 7]. Вкорінення значної кількості атомів, йонів, молекул між площинами гексагонів приводить до розсування шарів, зміни міжшарової взаємодії, ступеня анізотропії, внаслідок чого структура графіту залишається шаровою та ароматичною, але з більшою відстанню між шарами [11], що дозволяє управляти їх фізико-механічними, в т.ч. й антифрикційними, та хімічними властивостями. У цьому випадку під час тертя та зношування можуть бути реалізовані обидва механізми мастильної дії шарових сполук: облегшення зсуву шарів відносно один одного [10] та адсорбції атомів та молекул із зовнішнього середовища [5, 12, 13].

3. Відмінні від інших графітів властивості має термічно розщеплений графіт (TRG), який отримують при імпульсній високотемпературній термообробці сполук вкорінення металів, фторидів, хлоридів у графіт (СВГ). Метод полягає в окисненні графіту H₂SO₄ або HClO₄ з наступною обробкою за 873 – 2773 К [14 – 16].

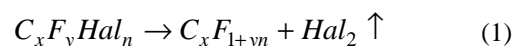
За високих температур відбувається виділення кисневих сполук, що утворилися на поверхні по дефектам та торцям кристалів графіту на початковій стадії процесу окиснення, з генерацією високого тиску. Внаслідок чого відбувається розділення вздовж осі С графітового кристаліту на тонкі пачкові стрічки з їх значною деформацією, що завершується утворенням складчастої структури [14]. Наявність розвинутої поверхні сильнодефектної структури і компонентів вкорінення в нанодисперсному стані обумовлює нові антифрикційні властивості таких матеріалів [14].

4. Відомі інтеркальовані шарові тверді мастила [17 – 37]: талійгалій диселеніду йонами літію з утворенням TlGaSe₂(Li⁺) [17]; титан диселеніду аргентумом – Ag_xTiSe₂ (де 0,24<x<0,30) [18, 23, 28, 34] або 3d-елементами – M_xTiSe₂ [де метал M=Cr, Fe, Co (0<x<0,25)] [19, 20]; титан дисульфід аргентумом – Ag_xTiS₂ (де 0,35<x<0,42) [21] або калієм – TiS₂(K⁺) [27]; талійгалій диселеніду йонами металу M⁺=Li⁺, K⁺, Na⁺ – TlGaSe₂(M⁺) [17]; титан дителуриду аргентумом – Ag_xTiTe₂ (де 0,30<x<0,75) [22 – 25, 28]; бісмут диселеніду йонами літію – Li_xBi₂Se₃ [26]; купрати барійітрію воднем – H₂YBa₂Cu₃O₇ та його окисненої форми – H₂YBa₂Cu₃O_{7,8} [29]; NbSe₃ або TiS₂ йонами літію – NbSe₃(Li⁺), TiS₂(Li⁺) [30, 31]; молібден дисульфід літієм – Li_xMoS₂ (де 0≤x≤1) [32] або металом (M=Cu, Fe, Ni, Li – Co) – Cu_yMo₆S_{8-z}, Fe_yMo₆S_{8-z}, Ni_yMo₆S₈, Li/Co_{1,6}Mo₆S_{7,7} [33]; титан диселеніду металами (M=Ag, Fe, Co, Ni, Mn, Cr) – Ag_xTiSe₂, Fe_xTiSe₂, Co_xTiSe₂, Ni_xTiSe₂, Mn_xTiSe₂, Cr_xTiSe₂ (де 0,1<x≤0,5) [19, 34 – 37]; квазидвовимірних сполук Cr_{0,3-x}Ni_xTaS₂ (де 0,08≤x≤0,23) [36].

Відомі інтеркальовані сполуки на основі карбону [38 – 50]: аморфного вуглецю атомами Al [38], нанокластерів графіту атомами Cu [39, 40],

фулеренових плівок галогенами [41], вуглецевих нанотрубок бромом [42], моношар графіту металами [43], фулеренових плівок телуrom з утворенням C₆₀Te_x (де 0,1<x<6,0) [44], моношарів графіту іттербієм [45], графіту HNO₃ з утворенням C₁₀HNO₃ [46], аморфного вуглецю Cu [47], графіту CuO [48], плівок графіту фулереном C₆₀ [49], нанокластерів графіту в аморфному вуглеці Cu [50].

Відома інтеркаляція графіту [51] та інтеркальовані сполуки на основі частинно фторованого графіту C_xF з ClF₃, BrF₃ (термообробкою за 403 – 573 К), а з HNO₃ і N₂O (термообробкою за 453 – 513 К) [52, 53], отримують фторований графіт при виділенні інтеркальованих молекул в газову фазу за реакцією [52, 53]:



А для C_xF_y, інтеркальованого SOCl₂, SO₂, (CH₃)₂CO, (C₂H₅)₂O, (C₂H₅)₂OH, CHCl₃, C₆H₆, C₅H₁₂, при термічній дії одночасно протікає два процеси: виділення вкорінених молекул у газову фазу та взаємодія інтеркалянта з C-F зв'язками фторованого графіту з утворенням складної суміші продуктів фторування і окиснення [52, 53].

Поліфторвуглець (CF_x)_n являє собою продукт фторування графіту, в якому у міжплощинний простір графітового каркасу вкорінені атоми фтору, що міцно зв'язані з одним із атомів карбону гексагонів кожного шару [52, 53].

5. Міжшарові сполуки графіту для твердих мастил отримують [4, 7, 8]:

- електрохімічним способом, наприклад бісульфату графіту загальної формули [C₂₄⁺(HSO₄)₇]⁻2H₂SO₄ або фториду графіту [C₂₄⁺HF₂]⁻2H₂F₂ з відстанню між шарами ~ 0,808 нм [4, 11];

- взаємодію з лужними металами і галогенами з утворенням C₈K, C₂₅K, C₃₆K, C₄₈K, C₆₀K, C₈Br, C₁₀Br, C₈Cl тощо [4];

- взаємодію з галогенідами металів, наприклад FeCl₂, FeCl₃ з різним заповненням шарів від 5 до 43% та відстанню між шарами 0,94-0,95 нм (міжшарова відстань для вихідного графіту 0,335 нм), CrO₃, MoCl₅ [4, 11, 18].

Відомі міжшарові сполуки і інших твердих мастил (BN, MoS₂, WS₂, SnS₂, бентоніт), які отримані інтеркаляцією їх хлоридами Sb, As, Cu, Fe, Al, Cr [4].

Властивості сполук вкорінення в графіт FeCl₃-CBr (III) [6] і FeCl₂-CBr (II) [11] вивчені в [11, 13, 54]. За [13] FeCl₃-CBr має склад FeCl₃-C_{7,7} (I ступінь) і FeCl₃-C_{14,9} (II ступінь).

I. Вибір об'єктів дослідження та порівняння, мета та завдання дослідження

1. Відомо [11] використання у пластичних масах на основі фурфурола та 33,3 – 66,6% інтеркальованої сполуки графіту FeCl₃ для підвищення антифрикційних та механічних властивостей композиту.

2. Порошок міді Cu⁰ або графіту чи дисперсії карбонізованих та графітованих волокон, які отримані піролізацією органічних волоконних матеріалів в

інертних середовищах за температур кінцевої термообробки 723 – 3073 К, що покриті міддю, використовують як добавки до пластичних мас, рідких та пластичних мастил і твердих композиційних матеріалів для пар тертя під час надвисоких навантажень [55 – 63].

3. Так, відомі пластичні мастила:

- яке містить **3 – 7%** механічної суміші порошків міді та графіту [64];

- яке містить **3 – 7%** порошка металізованого графіту (**30 – 50%** міді, цини або бронзи на графіті), обробленого блоккополімером оксидів алкленів [65];

- на основі **2 – 5%** літєвого мила стеаринової кислоти; **5 – 12%** аеросилу, модифікованого органосиланом; **0,3 – 0,6%** феніл- β -нафтиламіну; **1–3%** гліцерину; **1 – 2%** олеїнової кислоти; **0,05 – 0,2%** антранілової кислоти; **7 – 11%** мідного порошку та решта – мінеральна олива (мастило СМП-5) [66] для підвищення протизносних властивостей.

4. Недоліком відомих мастил [64 – 66] є низькі противозадірні властивості, що не дозволяє їх використовувати у високонавантажених вузлах тертя.

5. Мета роботи полягала у дослідженні антифрикційних властивостей (навантажувальної здатності та протизношувальних властивостей) пари тертя «сталь – сталь» під час надвисоких навантажень у точковому контакті при машенні пластичною пастою на основі синтетичних рідин або мінеральних олив, високодисперсних твердих додатків, поверхнево-активних речовин та інтеркальованого порошка графіту, покритого міддю.

6. Тому, в основу досліджень покладено завдання створити мастила на основі мінеральних олив і синтетичних мастильних рідин, мильного або немильного загущувача та інтеркальованої сполуки графіту.

7. Поставлене завдання досягалося тим, що мастильна паста містила 0,3 – 0,8% олеїнової кислоти, 3,5 – 10,5% гліцерину, 0,5 – 4,5% орґаноаеросилу, 5,5–14,5% олеата калію та додатково 12 – 25% інтеркальованої сполуки графіту FeCl_3 , яка була покрита 55 – 125% міді, решта – мінеральна олива або синтетична мастильна рідина [55].

II. Об'єкт та методи дослідження

Технологія вироблення мастильної пасти:

1. Синтез безводної сполуки (інтеркаляту) FeCl_3 [11]: у кварцеву трубку діаметра 25 мм і довжиною 1 м завантажували 60 г порошку заліза, трубку переносили у трубчаті піч, вентильовали під тиском 1,2 атм сухим аргоном і пропускали хлор на протязі 30 хв., потім нагрівали за 523 – 573 К на протязі 6 год. до повного хлорювання заліза. На стінках трубки осаджувався FeCl_3 у вигляді сублімованого продукту.

2. Синтез інтеркальованої сполуки графіту з FeCl_3 [11]: у такій же кварцовій трубці нагрівали 5 г мілкокристалічного графіту з 25 г безводного FeCl_3 у потоці хлору за 473 – 623 К на протязі 6 год. Потім трубку в печі зсували таким чином, щоб нагрівався лише один її кінець і продовжували нагрівати за 573 К на протязі 4 год. Чорні кристали, що утворилися,

промивали 10%-ним розчином HCl , а потім – дистиліатом води. Промитий продукт інтеркальованої сполуки графіту FeCl_3 містив, залежно від температури, 30 – 56% FeCl_3 . Отриманий продукт сушили 10 год. за 393 К.

За [11] отримували інтеркальовані сполуки графіту двох ступенів заповнення міжшарової відстані FeCl_3 (табл. 1).

Таблиця 1

Міжшарові ступені інтеркаляції графіту та їх антифрикційні властивості

Показник	Графіт	Ступінь	
		I	II
Період ідентичності вздовж вісі С, нм	0,670	0,950	1,285
Міжшарова відстань (товщина заповненого шару), нм	0,335	0,950	0,950
Вміст солі FeCl_3 в інтеркальованій сполуці графіту $\text{C}_x(\text{FeCl}_3)$, %	0	43	30
Навантажувальна здатність мастила на ЧКМТ (критичне нормальне навантаження на 1 кульку) $r_{\text{кр.}} \cdot \text{H}$	660	860	890

3. Міднення інтеркальованої сполуки графіту з FeCl_3 . Існує два методи («формальдегідний» [56, 57] та «цинковий» [57]) хімічного міднення вуглецевих матеріалів, ефективність яких доведено в роботах [58–63]:

- за «формальдегідною» технологією: наважку 5 г подрібненого вуглецевого волокнистого матеріалу (ВВМ) або порошка графіту промивали в етиловому спирті 10 хв., відфільтровували, оброблювали тринатрійфосфатом з концентрацією 30 г/л протягом 10 хв. за 353 К і промивали водою, що кипить. Знежирене вуглецеве волокно або графіт вносили до електроліту, який готували перемішуванням до повного розчинення $\text{Cu}(\text{OH})_2$. Окремо був приготовлений розчин гліцерину, NaOH і CuSO_4 з концентрацією 100 г/л. Після внесення вуглецевого волокнистого матеріалу або порошка графіту в електроліт, додавали водний розчин формальдегіду з концентрацією 150 г/л. Далі перемішували суспензію протягом 30 – 40 хв., відфільтровували, промивали водою до $\text{pH}=6,5\text{--}8,0$, далі промивали ацетоном і сушили за 323 – 333 К.

Змінюючи співвідношення компонентів електроліту та формаліну отримували приріст ваги мідненої речовини на поверхні частинок графіту або вуглецевого волокна, який може складати 23 – 78% від маси частинок за рахунок покриття складу $\text{Cu}^0+0,2\text{--}2,1\% \text{CuO}+0,2\text{--}1,6\% \text{Cu}_2\text{O}$.

- за «цинковою» технологією міднення проводили в робочому розчині складу: $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – 40 г/л; H_2SO_4 (конц.) – 18 мл/л; інтеркальованої сполуки

Таблиця 2

Досліджені мастильні композиції у вигляді пасти

Інгредієнт пасти	% вмісту інгредієнтів в композиції			
	1	2	3	4
1. Мінеральна олива або синтетична рідина (основа пасти)	78,2	61,45	44,7	82,0
2. Олеїнова кислота	0,30	0,55	0,80	1,0
3. Гліцерин	3,5	7,0	10,5	–
4. Органоаеросил (аеросил А-300, модифікований бутиловим спиртом)	0,5	2,5	4,5	5,0*
5. Олеат калію	5,5	10,0	14,5	–
6. Порошок інтеркальованої сполуки графіту FeCl ₃ :				
а) C _x (FeCl ₃), або	12,0	18,5	25,0	12,0
б) C _x (FeCl ₃)Cu(Ф): C _x (FeCl ₃) + Cu ⁰ – Cu ₂ O – CuO (мідне покриття за формальдегідною технологією), або	12,0 (55%)	18,5 (90%)	25,0 (125%)	12,0 (75%)
в) C _x (FeCl ₃)Cu(Zn): C _x (FeCl ₃) + Cu ⁰ + Cu ₂ O (мідне покриття за цинковою технологією)	12,0 (57%)	18,5 (88%)	25,0 (127%)	12,0 (75%)

* аеросил А-300

6. Випробування на навантажувальну здатність та зношування.

1. Висока чутливість точкового контакту до процесів, що виникають і супроводжують тертя та зношування твердих тіл, спонукали вибрати для дослідження схему контакту «куля-куля», який реалізується в чотирикульовій машині тертя (ЧКМТ) [68–72].

2. Чотири кульки для вальниць діаметром 12,7 мм зі сталі ШХ-15 (HRC 60-65), були складені у піраміду. Три долішні кульки були поміщені у підп'ятник і закріплені притискним кільцем. Горішня кулька жорстко була зафіксована у спеціальному патроні на кінцівці прямовисного валу.

Геометрія тетраедра визначала значення лінійної швидкості у зоні контакту *v*, величину нормальної складової *p_i* на 1 кульку в теоретичній точці контакту, осьової сили *p* на 3 кульки та момент тертя (розрахований коефіцієнт тертя *μ*) [62–72]:

$$u = \frac{d \cdot w}{2} \cdot \sin a = 0,576 \text{ pdn} \text{ [м/с]}, \quad (2)$$

$$p_i = \frac{P}{3 \cos a} = 0,4086p \approx 0,41p \text{ [Н]}, \quad (3)$$

графіту FeCl₃ – 20 г/л; Zn-порошок – 16 г/л; ZnSO₄ – 0,3 г/л. Цинк-порошок вносили в розчин, який вже містив інтеркальовану сполуку графіту FeCl₃, порціями при перемішуванні протягом 30 хв. за 293 К. Далі перемішували суспензію протягом 45 – 50 хв., відфільтровували, промивали водою до рН=6,0–6,5, далі промивали ацетоном і сушили за 323 – 333 К. Приріст ваги мідненої речовини на поверхні частинок графіту складав 55–75% за масою або вуглецевого волокна за рахунок Cu⁰+0,6–3,0%Cu₂O. Можна досягти будь-якого бажаного приросту міді аж до 250% за масою за 1–3 операції міднення залежно від відповідно взятої кількості необхідних реагентів.

Ванну для міднення можна використовувати багаторазово за рахунок збагачення розчину відповідною кількістю згаданих реактивів (CuSO₄·5H₂O, H₂SO₄, Zn-порошку). За 423 – 473 К поверхня міднення робиться синьою за рахунок обміну йонів Fe³⁺ на Cu¹⁺ чи Cu²⁺ в комірках графіту (комплекси йонів міді – інтенсивно синього кольору).

4. Приготування мастильної пасти. Склади композицій мастильної пасти приведені в табл. 2. Приклад 1. До 78,2 г авіаційної оливи МС-20 додавали 0,3 г олеїнової кислоти, 3,5 г гліцерину, 0,5 г бутосилу (аеросилу А-300, модифікованого бутиловим спиртом), 5,5 г олеату калію, 12 г інкальованої сполуки графіту C_x(FeCl₃), яка була покрита 55% Cu⁰-Cu₂O-CuO. Приготовлену масу змішували в скребковолопастному змішувачі протягом 10 хв. за температури 323 К. Після цього отриману пасту нагрівали до 353 К при працюючому змішувальному пристрою та за допомогою помпи (смока) прокачували через гомогенізуючий клапан протягом 20 хв. з поверненням пасти в змішуючий апарат. Потім мастильну пасту охолоджували до 303 К і змішувальний апарат розвантажували (паста №1).

У якості мінеральної оливи використали авіаційну оливу МС-20, а у якості синтетичної рідини – полігліколь «Orites-210DS», етер двоосновної органічної кислоти «Anderol-500», гліцерин (марки ч.д.а.), перфторполіетер ПЕФ-180. До рідкої основи додавали: 0,3 – 1,0% олеїнової кислоти; 3,5 – 10,5% гліцерину; 0,5 – 4,5% бутосилу Б-1 (аеросил А-300, модифікований бутиловим спиртом) (паста складу №1, 2, 3) або немодифікований аеросил А-300 (паста складу №4); 12 – 25% порошку інтеркальованої сполуки графіту C_x(FeCl₃) без покриття або з нанесеним покриттям (55–125%) Cu⁰-Cu₂O-CuO за формальдегідною технологією [C_x(FeCl₃)Cu(Ф)], або з нанесеним покриттям (57–127%) складу Cu⁰-Cu₂O за цинковою технологією [C_x(FeCl₃)Cu(Zn)] (табл. 2). У пластичне мастило ВНИИ НП-282 на основі перфторполіетеру ПЕФ-180, яка загуснута 2,5% силікагелем, модифікованого триметилтрихлорсиланом та трибутилтрихлорсиланом, до якого додано лише 12% порошку C_x(FeCl₃) або C_x(FeCl₃)Cu.

5. Пластичне мастило СМП-5 [66] вибрано у якості об'єкта порівняння наступного складу: 4,5% літєвого мила стеаринової кислоти + 5% аеросила А-300, модифікованого бутилоксисиланом + 0,3% феніл-β-нафтиламіну + 3% гліцерину + 1% олеїнової кислоти + 0,05% антранілової кислоти + 9% мідного порошку Cu⁰ + 77,15% авіаційної оливи МС-20.

де $d=12,7 \cdot 10^{-3}$ [м] – діаметр кульок;
 $\omega=2\pi n$ – кутова швидкість обертання горішньої кульки [c^{-1}] (n – число обертів цієї кульки за секунду; частота обертання f);
 $\alpha=35^{\circ}20'$ – кут між висотою і ребром правильного тетраедра (кут в основі піраміди з чотирьох кульок);

$$m = \frac{F}{p} = \frac{2rQ}{dptga}, \quad (4)$$

де Q – сила, що згинала тензобалку;
 F – сила тертя;
 r – відстань від осі обертання верхньої кульки до точки дотику важеля з тензодавачем.

3. Випробування на навантажувальну здатність плівок мастил на поверхні сталі ШХ-15 проводили при 660, 832, 1140, 1490 обертів за хвилину горішньої кульки (частота обертання $f=11 c^{-1}$, $13,87 c^{-1}$, $19,0 c^{-1}$, $24,83 c^{-1}$ відповідно), що відповідало лінійній швидкості у зоні контакту $v=0,2527$ м/с, $0,3186$ м/с, $0,4364$ м/с, $0,5703$ м/с відповідно.

Під час визначення навантаження заїдання – критичного навантаження $r_{кр.}$ та $r_{ікр.}$, при випробуванні спостерігається підвищений знос сталі. Навантаження r змінювали ступенями від $100-200$ Н до $r < r_{кр.}$ та $r > r_{кр.}$, а в ділянці $r=r_{кр.}$ – через $10-25$ Н. Кожний дослід тривав 15 с або 60 с і проводився окремо з новою порцією мастила. ЧКМТ була обладнана тензOMETричним пристроєм і потенціометром КСП-4, що дозволяло перехід до $r_{кр.}$ фіксувати за різким зростанням моменту тертя (відповідно коефіцієнта тертя). Температура мастильної оливи визначали за $\sim 2,5$ мм від зони контакту, яка в момент задиру становила $T=353-363$ К.

Початковий p_0 та у кінці випробування p_k тиски у зоні контакту, що витримувала мастильна плівка розраховували за [69]:

$$p_0 = p_i \sqrt{\frac{pd_2^2}{4}}, \quad (5)$$

$$p_k = p_i \sqrt{\frac{pd_3^2}{4}}, \quad (6)$$

де d_3 – середній діаметр плями зношування для однієї кульки;
 d_r – середній діаметр плями пружної деформації за Герцем, розрахований за формулою [69] для однієї кульки:

$$d_z = 1,763 \sqrt{\frac{p_i d / 2}{E}} = 0,0409483 \sqrt{p} \text{ [мм]}, \quad (7)$$

де $E=206010$ [Н/м²] – модуль пружності Юнга сталі ШХ-15; p_i , p в [Н]; d в [мм].

4. Випробування на зношування сталі ШХ-15 при наявності на їх поверхнях плівок мастил проводили на ЧКМТ [68 – 72] при:

а) $p=400$ Н ($p_i=163,4$ Н); $n=660$ об./хв. ($f=11 c^{-1}$); $v=0,2527$ м/с; $T=323-333$ К; тривалість дослідів – 5 год.; число повторних дослідів – 5 ;

б) $p=200$ Н ($p_i=81,7$ Н); $n=1470$ об./хв. ($f=24,5 c^{-1}$); $v=0,5628$ м/с; $T=318-328$ К; $\tau=4$ год.; число повторних дослідів – 5 .

III. Результати та обговорення

1. Дослідження впливу міжшарового ступеня інтеркаляції графіту $FeCl_3$, показало (табл. 1), що перехід від ступеня I інтеркаляції до II мало змінює антифрикційні властивості мастильних паст (склад №2) на основі авіаційної оливи $MC-20+C_x(FeCl_3)$.

2. Дослідження співвідношення інградієнтів мастильних паст складу №1, №2, №3 (табл. 2) показало на суттєвий вплив інградієнтів на навантажувальну здатність плівок на заїдання контакту «сталь–сталь» (табл. 3).

Таблиця 3

Вплив інградієнтів та їх концентрації в мастильних пастах на навантажувальну здатність плівок, утворених на сталевих поверхнях з цих паст

№ композиції мастильної паст (табл. 2)	Мастильна рідка основа	Критичне навантаження на 1 кульку $r_{ікр.}$, Н
–	Мінеральна олива авіаційна MC–20	426
1	Мінеральна олива авіаційна MC–20	820
2	Мінеральна олива авіаційна MC–20	1070
3	Мінеральна олива авіаційна MC–20	1210
СМП–5	Мінеральна олива авіаційна MC–20	760
–	Полігліколь «Orites–210DS»	638
2	Полігліколь «Orites–210DS»	820
–	Етер двоосновної органічної кислоти «Anderol–500»	328
2	Етер двоосновної органічної кислоти «Anderol–500»	1230
–	Гліцерин	394
2	Гліцерин	1640
–	Перфторполіетер ПЕФ–180	1800
2	Перфторполіетер ПЕФ–180	3590

3. Порівняння навантажувальної здатності мастильних плівок, що утворилася на сталевих поверхнях з пластичних мастил на основі: перфторполіетера ПЕФ–180, загуслого органосилікагелем, (ВНИИ НП–282) (3); солідола синтетичного (4); вуглеводневої рідини – вазелинової оливи МВП для приладів, загуслої стеаритом літію, (ЦИАТИМ–201) (5); вуглеводневої оливи, загуслої твердими вуглеводами, (технічний вазелін) (6), при випробуваннях на ЧКМТ при умовах: $n=1140$ об./хв. ($f=19 c^{-1}$); $v=0,4364$ м/с; $\tau=60$ с, показали (рис. 1), що плівки з пластичних мастил на вуглеводневій основі мають набагато менші критичні навантаження [$r_{кр.}=715$ (4); 560 (5); 600 (6) Н відповідно] при

діаметрах плям початку заїдання $d_{кр.}=0,62$ (4); 0,60 (5); 0,61 (6) мм відповідно, ніж плівки з пластичних мастил на перфторполіетерній основі [$p_{кр.}=3200$ Н (3) при $d_{кр.}=1,13$ мм (3)]. При цьому, якщо в межах $p=200-400$ Н закономірності зношування сталі при мащенні пластичними мастилами на вуглеводневій та перфторполіетерній основах однакові, то при $p>1200-1600$ Н до $p_{кр.}$ для мастил на перфторполіетерній основі спостерігається плоска ділянка для $d=f(p)$, що знаходить пояснення у зміні механізму утворення поверхневих плівок на верхній сталі: перехід від фізичної до хімічної адсорбції.

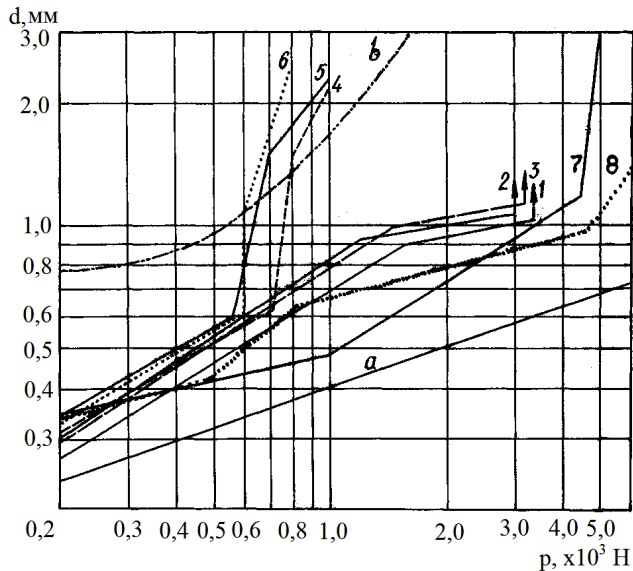


Рис. 1. Залежність діаметру плями зносу сталі ШХ-15 від нормального навантаження на 3 кульки (p) при випробуваннях на ЧКМТ пластичних мастил при числі обертів верхньої кульки за хвилину $n=832$ (1), 1140 (3–6), 1490 (2) при часі навантаження на одному ступені $\tau=60$ с (1–6) та $n=660$ і $\tau=15$ с (7, 8):

1 – 3, 7 – ВНИИ НП–282; 4 – солідол синтетичний; 5 – ЦИАТИМ–201; 6 – технічний вазелін; 8 – ВНИИ НП–282+30% $C_x(FeCl_3)Cu(Zn)$, де 45% $C_x(FeCl_3)$ + 55% (Cu^0+Cu_2O) ; а – лінія пружної деформації за Герцем; б – лінія зношування кульок під час тертя без мащення.

З рис. 1 видно, що зміна частоти обертання верхньої кулі від $f=13,87$ с⁻¹ до $24,83$ с⁻¹ (від $n=832$ до

1490 об./хв.), тобто зміни лінійної швидкості переміщення тіл ковзання в точковому контакті від $v=0,3186$ м/с до $0,5703$ м/с відповідно, мало впливає на величини навантаження заїдання під час $\tau=60$ с тесту випробування пластичного мастила на основі перфторполіетеру: $p_{кр.}=3400$ Н ($n=832$ об./хв.) (1) при $d_{кр.}=1,03$ мм; $p_{кр.}=3200$ Н ($n=1140$ об./хв.) (3) при $d_{кр.}=1,13$ мм; $p_{кр.}=3000$ Н ($n=1490$ об./хв.) (2) при $d_{кр.}=1,07$ мм. Але, при переході на $\tau=15$ с тест та $n=660$ об./хв., величина навантаження заїдання різко зростає до $p_{кр.}=4400$ Н при $d_{кр.}=1,18$ мм і змінюється вид кривої залежності $d=f(p)$ (7) на всьому діапазоні навантажень (рис. 1).

Введення 30% інтеркальованої сполуки графіту $C_x(FeCl_3)Cu(Zn)$, у якій 45% $C_x(FeCl_3)$, що покриті 55% (Cu^0+Cu_2O) , під час випробувань на ЧКМТ ($n=660$ об./хв.; $\tau=15$ с) збільшує $p_{кр.}$ до 4700 Н при $d_{кр.}=0,98$ мм та змінює вид кривої $d=f(p)$ (8) на всьому діапазоні навантажень:

- $p \leq 500$ Н d (без сполуки) $\approx d$ (зі сполукою);
- 500 Н $< p \leq 2500$ Н d (без сполуки) $< d$ (зі сполукою);
- 2500 Н $< p \leq p_{кр.}$ d (без сполуки) $> d$ (зі сполукою).

4. Дослідження антифрикційних властивостей мастила ПЕФ–180 і мастильних композицій на його основі показали (табл. 4; рис. 2), що при введенні 12% $C_x(FeCl_3)$ (паста №4, табл. 2) критичне навантаження зростає у 2 рази, але при цьому дещо збільшується пляма зносу. Це свідчить про те, що $C_x(FeCl_3)$ у складі ПЕФ–180 є ефективною присадкою проти заїдання, але не є протизносною присадкою. Оміднення інтеркальованої сполуки графіту $FeCl_3 [C_x(FeCl_3)Cu]$ не впливає суттєво на антифрикційні властивості пластичного мастила ВНИИ НП–282 на основі перфторполіетеру.

Найбільший ефект проти заїдання проявляється при введенні 12% $C_x(FeCl_3)$ в етер двоосновної кислоти Anderol–500 і гліцерин: критичне навантаження зростає більше, ніж у 8,7 і 3,4 рази відповідно (табл. 4; рис. 3, 4). Оміднення інтеркальованої сполуки графіту $FeCl_3$ підсилює ефект проти заїдання в мастилах на основі Anderol–500 і гліцерину: критичне навантаження зростає у 3,8 і 4,2 рази відповідно, зношування при цьому дещо збільшується (табл. 4; рис. 3, 4).

Таблиця 4

Антифрикційні властивості мастил з розробленими графітовими наповнювачами

Наповнювач	Критичне навантаження на 1 кулю, $p_{кр.}$, Н				Діаметр плями зносу, мм			
	$\tau=60$ с $f=24,83$ с ⁻¹	$\tau=15$ с; $f=11$ с ⁻¹			$p_i=82$ Н $f=24,83$ с ⁻¹ $\tau=4$ год.	$p_i=164$ Н; $f=11$ с ⁻¹ ; $\tau=1$ год.		
		–	$C_x(FeCl_3)$	$C_x(FeCl_3)Cu$		–	$C_x(FeCl_3)$	$C_x(FeCl_3)Cu$
СМП–5	510	760	–	–	0,65	0,63	–	–
Гліцерин	275	394	1330	1640	0,65	0,64	0,87	0,93
Orites–210DS	447	738	780	820	0,64	0,63	0,68	0,74
Anderol–500	242	328	>2860	1230	1,00	0,74	0,77	1,04
ПЕФ–180	1150	1800	3590	1690	0,54	0,48	0,73	0,77
ВНИИ НП–282	1230	1820	3620	1720	0,60	0,63	0,67	0,71

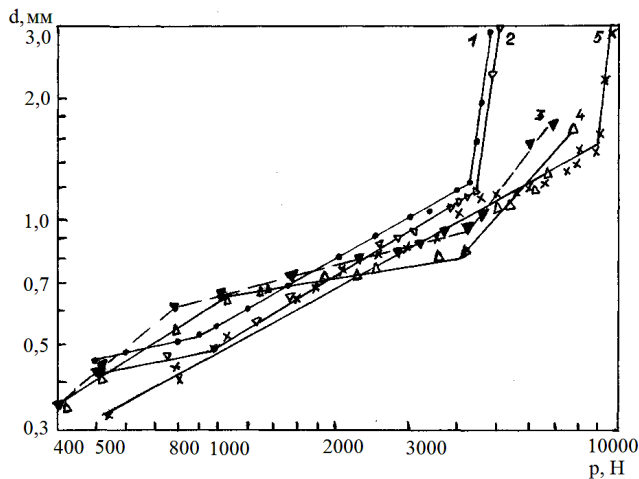


Рис. 2. Залежність діаметра плями зносу від навантаження при дослідженні на ЧКМТ ($n=660$ об./хв.; $f=11$ с $^{-1}$; $\tau=15$ с) мастил на основі перфторполіетеру:

1 – ПЕФ–180; 2 – ВНИИ НП–282; 3 – ВНИИ НП–282 + 12% інтеркальованої сполуки графіту $FeCl_3$, покритої 75% міді $C_x(FeCl_3)Cu(Zn)$; 4 – ПЕФ–180 + 12% $C_x(FeCl_3)Cu(\Phi)$ + 5% аеросилу А-300 + 1% олеїнової кислоти; 5 – ПЕФ–180 + 12% $C_x(FeCl_3)$ + 5% аеросилу А-300 + 1% олеїнової кислоти.

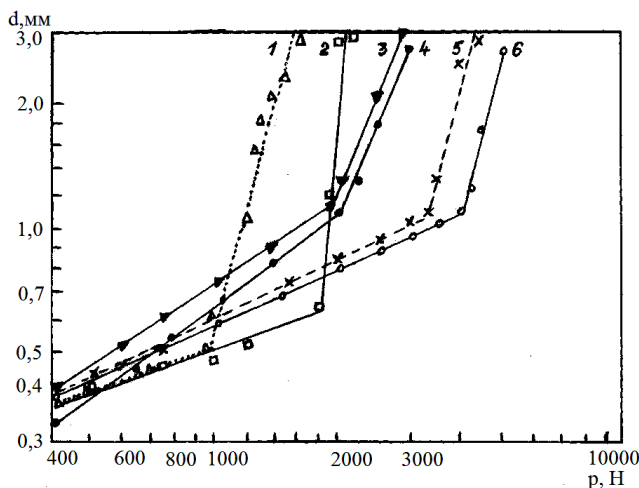


Рис. 3. Залежність діаметра плями зносу від навантаження при дослідженні на ЧКМТ ($n=660$ об./хв.; $f=11$ с $^{-1}$; $\tau=15$ с) мастильних композицій на основі полігліколієвої оливи Orites–210DS (2-4) та на основі гліцерину (1; 5; 6): 1, 2 – без наповнювачів; 3; 5 – пластичне мастило: 5% аеросилу А-300 + 1% олеїнової кислоти + 12% $C_x(FeCl_3)$; 4; 6 – пластичне мастило: 5% аеросилу + 1% олеїнової кислоти + 12% $C_x(FeCl_3)Cu(\Phi)$.

Дослідження антифрикційних властивостей пластичного мастила порівняння СМП–5 [66], яка містить порошок міді Cu^0 , показали, що воно має значно гірші протизаїдальні властивості, ніж мастила з інтеркальованими присадками $C_x(FeCl_3)$ та $C_x(FeCl_3)Cu$ (рис. 4).

Вказані позитивні результати досягаються не тільки за рахунок отриманої плівки в контакт, але і самого порошка наповнювача. За рахунок своєї пластичності, малих зсувних, розривних напружень плівка надає контакту більшу фактичну площу.

Частинки наповнювача своєю присутністю також збільшують фактичну площу контакту, а після попадання в контакт, вони в певній мірі амортизують динамічну силу взаємодії мікроступів.

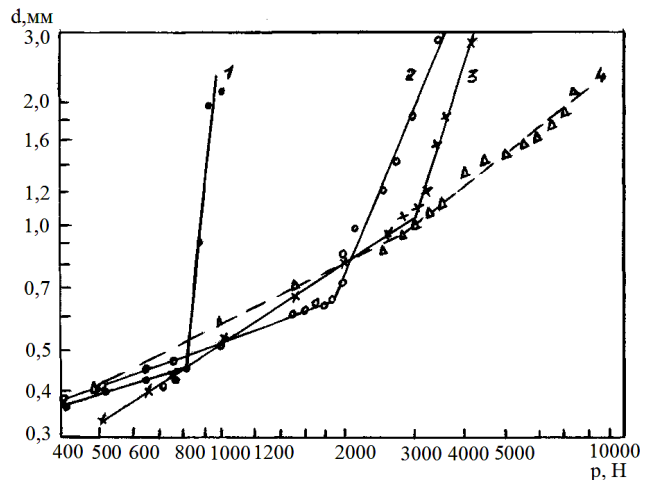


Рис. 4. Залежність діаметра плями зносу від навантаження при дослідженні на ЧКМТ ($n=660$ об./хв.; $f=11$ с $^{-1}$; $\tau=15$ с) пластичного мастила СМП-5 [66] на основі мінеральної оливи, порошку міді та ін. інгредієнтів (2); етеру двоосновної кислоти Anderol–500 (1) та мастильних паст на її основі, загуслих 5% аеросилу +1% олеїнової кислоти +12% $C_x(FeCl_3)Cu(\Phi)$ (3) або 12% $C_x(FeCl_3)$ (4).

Висновки

1. Ступінь інтеркаляції сполуки графіту $FeCl_3$ не впливає на навантажувальну здатність плівок з мастильних композицій на основі мінеральних олив та синтетичних рідин, утворених на поверхнях сталі у високонавантаженому точковому контакті.

2. Величини швидкостей ковзання та часу випробувань у сукупності значно впливають на навантаження заїдання, а додатково ще й величини навантаження визначають знос металу під час тертя та зношування в точковому високонавантаженому контакті, на якому формуються мастильні плівки з композицій синтетичних та мінеральних олив та присадок $C_x(FeCl_3)$ та $C_x(FeCl_3)Cu$.

3. Природа рідкої мастильної основи та склад мастильних паст, поруч з іншими факторами визначають вплив присадок $C_x(FeCl_3)$ та $C_x(FeCl_3)Cu$ на антифрикційні властивості: при введенні $C_x(FeCl_3)$ найбільший ефект спостерігається для перфторполіетерів, пластичних мастил на їх основі та етеру органічної двоосновної кислоти, а $C_x(FeCl_3)Cu$ – для гліцерину (остання присадка завдяки гліцерину забезпечує ефект вибіркового переносу міді в металевому контакті).

4. При створенні високоефективних пластичних мастил на основі гліцерину, полігліколевих і вуглеводневих рідин доцільно вводити до їх складу присадки інтеркальованих сполук графіту $FeCl_3$, $C_x(FeCl_3)$ та $C_x(FeCl_3)Cu$, які виявляють значний ефект проти заїдання.

Сіренко Г.О. – професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри теоретичної і прикладної хімії;
Солтис Л.М. – аспірант кафедри теоретичної і прикладної хімії;
Складанюк М.Б. – аспірант кафедри теоретичної і прикладної хімії;
Сабадах Н.І. – асистент кафедри теоретичної і

прикладної хімії;
Свідерський В.П. – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри зносостійкості та надійності машин;
Кириченко Л.М. – старший науковий співробітник;
Ільницький Р.В. – кандидат фізико-математичних наук, завідувач відділу аспірантури.

- [1] С.И. Дякин, Т.П. Филатова. Некоторые концепции применения материалов в тяжело нагруженных трибоспряжениях // *Долговечность трущихся деталей машин*. Машиностроение, Москва, сс. 19 – 31 (1987).
- [2] И.Г. Фукс. *Добавки к пластическим смазкам*. Химия, Москва, 248 с. (1982).
- [3] К.Дж. Бонер. *Производство и применение консистентных смазок* / Пер. с англ. под. ред. В.В. Сеницына. Гостоптехиздат, Москва, 704 с. (1958).
- [4] А.Р. Убеллоде, Ф.А. Льюис. *Графит и его кристаллические соединения*. Мир, Москва, 256 с. (1965).
- [5] Ю.Н. Васильев. Природа смазочной способности графита // *Трение и износ*, **4** (3), сс. 483 – 491 (1983).
- [6] И.Э. Виноградова. *Противоизносные присадки к маслам*. Химия, Москва, 272 с. (1972).
- [7] С.В. Шулепов. *Физика углеграфитовых материалов*. Металлургия, Москва, 254 с. (1972).
- [8] *Химические и физические свойства углерода* / Пер. с англ. Г.Б. Демидовича, Ю.А. Зарифьянца, О.В. Никитиной, Р.В. Прудникова. Под ред. Л. Филипа и Ф. Уокера. Мир, Москва, 367 с. (1969).
- [9] В.З. Вайнштейн, Т.И. Трояновская. *Сухие смазки и самосмазывающиеся материалы*. Машиностроение, Москва, 180 с. (1968).
- [10] Е.Р. Брейтуэйт. *Твердые смазочные материалы и антифрикционные покрытия*. Химия, Москва, 320 с. (1967).
- [11] В.В. Коршак, М.Е. Вольпин, И.А. Грибова и др. Использование ламинарных соединений графита с хлористым железом в качестве наполнителя полимерных систем // *Пластические массы*, (1), сс. 20 – 23 (1973).
- [12] Ю.Н. Васильев, В.А. Фугель. Влияние адсорбции на характер трения графита // *Проблемы трения и изнашивания*, (8), сс. 122 – 128 (1975).
- [13] Ю.Н. Васильев. Применение межслоных соединений графита в качестве сухой смазки в осушенном азоте // *Конструкционные материалы на основе графита*. Металлургия, Москва, сс. 189 – 190 (1969).
- [14] А.С. Скоропанов, И.А. Булгак, Г.И. Курневич. Термически расщепленный графит / Тез. докладов Белорусского республ. научно-технич. совещ. «Применение термичного анализа для интенсификации технологических процессов и создания прогрессивных материалов». Минск, с. 48 (1988).
- [15] А.С. Скоропанов, С.А. Альфер. *Термозащитное покрытие из термически расщепленного графита* // НИИ физхимпроблем Беларус.госуд.ун-та, Инф.л.–Минск. 3 с. (1984).
- [16] А.С. Скоропанов. *Пенообразный графит* // НИИ физхимпроблем Беларус.госуд.ун-та, Инф.л.–Минск. 3 с. (1987).
- [17] С.Н. Мустафаева, Э.М. Керимова, Н.З. Гасанов. Экситонные характеристики интеркалированного монокристалла $TiGaSe_2$ // *Физика и техника полупроводников*, **32** (2), сс. 145 – 147 (1998).
- [18] В.М. Антропов, А.Н. Титов, Л.С. Красавин. Аномальное поведение электрических свойств диселенида титана, интеркалированного серебром // *Физика твердого тела*, **38** (4), сс. 1288 – 1291 (1996).
- [19] А.В. Куранов, В.Г. Плещев, А.Н. Титов, Н.В. Баранов, Л.С. Красавин. Влияние интеркаляции 3d-элементами на структуру и физические свойства диселенида титана M_xTiSe_2 ($M=Cr, Fe, Co$) // *Физика твердого тела*, **42** (11), сс. 2029 – 2032 (2000).
- [20] А.Н. Титов, А.В. Долгошеин, И.К. Бдикин, С.Г. Титова. Определение величины поляронного сдвига интеркалатных соединений на основе диселенида титана // *Физика твердого тела*, **42** (9), сс. 1567 – 1569 (2000).
- [21] А.Н. Титов, Х.М. Биккин. Электронные свойства и параметры спектра носителей заряда дисульфида титана, интеркалированного серебром // *Физика твердого тела*, **34** (11), сс. 3593 – 3595 (1992).
- [22] А.Н. Титов, С.Г. Титова. Упорядочение интеркалированной примеси вблизи температуры коллапса поляронной зоны в Ag_xTiTe_2 // *Физика твердого тела*, **43** (4), сс. 605 – 610 (2001).
- [23] Л.С. Красавин, М.В. Спицин, А.Н. Титов. Электронные кинетические свойства высокотемпературной фазы интеркалатного соединения Ag_xTiSe_2 // *Физика твердого тела*, **39** (1), сс. 61 – 62 (1997).
- [24] А.Н. Титов, А.В. Долгошеин. Особенности термодинамики электронной подсистемы интеркалированных диалькогенидов титана // *Физика твердого тела*, **40** (7), сс. 1187 – 1189 (1998).
- [25] А.Н. Титов. Переход металл – полупроводник в дителлуриде титана, интеркалированном серебром // *Физика твердого тела*, **38** (10), сс. 3126 – 3128 (1996).
- [26] И.И. Григорчак, В.В. Нетяга, С.В. Гаврилюк, Б.П. Бахматюк, З.Д. Ковалюк. Свойства селенида висмута, интеркалированного литием из раствора $n-C_4H_9Li$ // *Физика твердого тела*, **43** (8), сс. 1385 – 1387 (2001).
- [27] И.И. Пронин, М.В. Гомоюнова, Д.А. Валдайцев, Н.С. Фараджев. Начальные стадии интеркаляции монокристаллов $1T-TiS_2$ (0001) калием // *Физика твердого тела*, **43** (9) (2001).

- [28] А.Н. Титов, А.В. Долгошеин. Фазовые диаграммы интеркалатных материалов с поляронным типом локализации носителей // *Физика твердого тела*, **42** (3) (2000).
- [29] Ю.М. Байков. Интеркалированный водород в купрате бария-иттрия: состояние и подвижность «гостя», модификация свойств «хозяина» // *Физика твердого тела*, **42** (6) (2000).
- [30] B.V. Ratnakumar, G. Nagasubramanian, S.Di Stefano, C.P. Bankston. Kinetics of intercalation of Lithium into NbSe₃ and TiS₂ cathodes // *J. Electrochem. Soc.*, **139** (6), pp. 1513 – 1521 (1992).
- [31] Keiichi Kanehori, Fumiyoshi Kirino, Tetsuichi Kudo, Katsuki Miyauchi. Chemical diffusion coefficient of Lithium in Titanium disulfide single crystals // *J. Electrochem. Soc.*, **138** (8), pp. 2216 – 2219 (1991).
- [32] Rod S M Millan, M.W. Juzkow. In situ measurements of gas evolution in secondary Lithium cells // *National Research Council Canada*, pp. 149 – 162.
- [33] Shinichiro Yamaguchi, Takashi Uchida, Masataka Wakihara. A rechargeable Lithium battery employing Cobalt chevrephase compound as the cathode // *J. Electrochem. Soc.*, **138** (3), pp. 687 – 689 (1991).
- [34] Л.С. Красавин, А.Н. Титов, В.М. Антропов. Влияние интеркаляции серебром на состояние с волной зарядовой плотности в TiSe₂ // *Физика твердого тела*, **40** (12), сс. 2165 – 2167 (1998).
- [35] В.Г. Плещев, А.Н. Титов, А.В. Куранов. Электрические и магнитные свойства диселенида титана, интеркалированного кобальтом // *Физика твердого тела*, **39** (9) (1997).
- [36] Г.А. Такзей, М.В. Гавриленко, П. Ескуинази, Л.М. Куликов, И.И. Сыч. Замороженные магнитные состояния в квазидвумерных соединениях Cr_{1/3-x}Ni_xTaS₂ с конкурирующими обменными взаимодействиями // *Физика твердого тела*, **39** (10) (1997).
- [37] В.Г. Плещев, А.Н. Титов, Н.В. Баранов. Структурные характеристики и физические свойства диселенида титана, интеркалированного марганцем // *Физика твердого тела*, **44** (1) (2002).
- [38] Н.Р. Галль, Е.В. Рутьков, А.Я. Тонтугоде. Эффективность интеркалирования атомов алюминия под монослойную и субмонослойную двумерную графитовую пленку на металле // *Физика и техника полупроводников*, **36** (3) (2002).
- [39] В.И. Ивнов-Омский, Т.К. Звонарева, Г.С. Фролова. Колебательные моды углерода в гидрогенизированном аморфном углероде, модифицированном медью // *Физика и техника полупроводников*, **34** (12) (2000).
- [40] В.И. Ивнов-Омский, Э.А. Сморгонская. Модифицирование электронного спектра и колебательных свойств аморфного углерода примесью меди // *Физика и техника полупроводников*, **32** (8) (1998).
- [41] В.В. Афросимов, И.Б. Захарова, Р.Н. Ильин, Т.Л. Макарова, В.И. Сахаров, И.Т. Серенков. Исследование интеркалированных фуллереновых пленок методом рассеяния ионов средних энергий // *Физика твердого тела*, **44** (3) (2002).
- [42] А.И. Романенко, О.Б. Аникеева, А.В. Окотруб, Л.Г. Булушева, Н.Ф. Юданов, С. Dong, Y. Ni. Транспортные и магнитные свойства многослойных углеродных нанотрубок до и после интеркалирования бромом // *Физика твердого тела*, **44** (4) (2002).
- [43] А.Г. Стародубов, М.А. Медвецкий, А.М. Шикин, Г.В. Прудникова, В.К. Адамчук. Интеркаляция благородных металлов под монослой графита на поверхности Ni (111) // *Физика твердого тела*, **44** (4) (2002).
- [44] Т.Л. Макарова, В.Г. Мелехин, И.Т. Серенков, В.И. Сахаров, И.Б. Захарова, В.Э. Гасумянц. Оптические и электрические свойства пленок C₆₀Te_x // *Физика твердого тела*, **43** (7) (2001).
- [45] А.М. Шикин, М.В. Пойгин, Ю.С. Дедков, С.Л. Молодцов, В.К. Адамчук. Формирование интеркалятоподобных систем на основе монослоев графита и иттербия на поверхности Ni (111) // *Физика твердого тела*, **42** (6) (2000).
- [46] А.М. Зиятдинов. Особенности электропроводности в несоразмерной фазе интеркалированного соединения графита C₁₀HNO₃ // *Физика твердого тела*, **42** (7) (2000).
- [47] В.И. Ивнов-Омский, Э.А. Сморгонская. Смещение заряда при интеркаляции графитоподобных нанокластеров в аморфном углероде медью // *Физика твердого тела*, **41** (5) (1999).
- [48] В.Ф. Мастеров, А.В. Приходько, О.И. Коньков, А.А. Шакланов. Электрические свойства монослоев Cu – O, интеркалированных в кристаллический графит // *Физика твердого тела*, **39** (1) (1997).
- [49] Н.Р. Галль, Е.В. Рутьков, А.Я. Тонтугоде, М.М. Усуфов. Интеркалирование атомами и молекулами двумерной графитовой пленки на металлах // *Журнал технической физики*, **69** (9) (1999).
- [50] В.И. Ивнов-Омский, Г.С. Фролова. ИК-спектроскопия интеркалированных медью нанокластеров графита в аморфном углероде // *Прикладной журнал технической физики*, **26** (14) (2000).
- [51] И.А. Булгак, А.С. Скоропанов. *Интеркалированные графиты* // НИИ физхимпроблем Беларус.госуд.ун-та, Инф.л.–Минск. 3 с. (1986).
- [52] А.С. Скоропанов, Г.И. Курневич. *Полифторуглерод* // НИИ физхимпроблем Беларус.госуд.ун-та, Инф.л.–Минск. 3 с. (1987).
- [53] А.М. Даниленко, А.С. Назаров, В.М. Паасонен, И.И. Яковлев. Исследование термических свойств интеркалированных соединений фторированного графита // Тез. докладов Белорусского республ. научно-технич. совещ. «Применение термического анализа для интенсификации технологических процессов и создания прогрессивных материалов». Минск, с. 94 (1988).
- [54] Т.А. Кизина, И.В. Булгак, А.С. Скоропанов, Б.О. Филонов. Термический анализ СВГ с FeCl₃ // Тез. докладов Белорусского республ. научно-технич. совещ. «Применение термического анализа для

- [55] интенсификации технологических процессов и создания прогрессивных материалов». Минск, с. 49 (1988).
- [56] Масильна паста. Пат. 17916 (Україна), МКИ С10М 5/07. Л.М. Кириченко, Г.О. Сіренко, В.П. Свідерський, В.І. Кириченко. – №95020851. – Заявл. 23.02.95. – Опубл. 3.06.97. – Оф. бюл. “Промислова власність” №5 за 1997р.
- [57] Антифрикционная композиция флубон – М: А.с. 1165048 (СССР), МКИ С08L27/18; С08К3/04/ Г.А. Сіренко, В.П. Свідерський, І.І. Новиков, В.П. Захаренко. – №3655636. – Заявл. 24.10.83. – Зареєстр. в Госреестре изобр. СССР 1.03.85. – Опубл. 1985. – Бюл. №24.
- [58] Способ химического меднения углеродных материалов: А.с. 1604862 (СССР), МКИ С23С18/38; С23С18/54/ В.І. Кириченко, Г.А. Сіренко, Л.М. Кириченко. – №4465219. – Заявл. 16.05.88. – Опубл. 7.11.90. – Бюл. №41. – С. 132.
- [59] В.І. Кириченко, Г.А. Сіренко, Л.М. Кириченко. Получение и работоспособность антифрикционных материалов с медненным наполнителем // *Вопросы химии и химической технологии*, (94), сс. 113–118 (1991).
- [60] Г.О. Сіренко, М.Б. Квич, В.І. Кириченко. Відновлення міді в поверхневих шарах металізованого карбонового волокна // *Фізика і хімія твердого тіла*, **7** (3), сс. 544 – 550 (2006).
- [61] Г.О. Сіренко, М.Б. Квич, Л.Я. Мідак. Структура та фазовий склад поверхневих плівок карбонового волокна, омідненого в присутності PbS // *Фізика і хімія твердого тіла*, **9** (1), сс. 153 – 161 (2008).
- [62] Г.О. Сіренко, Л.Я. Мідак, М.Б. Складанюк. Мас-спектральний аналіз газовиділення з вуглецевих волокон, покритих тонкими шарами міді // *Фізика і хімія твердого тіла*, **10** (1), сс. 215 – 228 (2009).
- [63] Г.О. Сіренко, Л.М. Кириченко, В.І. Кириченко, В.П. Свідерський. Структура лігандів комплексних сполук міді (II) і працездатності їх як присадок до нових мастильних композицій // Темат.зб.наук.праць техн.ун-ту Поділля «Проблеми сучасного машинобудування», Хмельницький: ТУП, сс. 145 – 147 (1996).
- [64] М.Б. Квич, Г.О. Сіренко, В.І. Кириченко. Відновлення міді в поверхневих шарах металізованого карбонового волокна // *Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. Василя Стефаника. Сер. Хімія*, (V), сс. 84 – 91 (2008).
- [65] В.Г. Мельников, А.А. Калинин, Н.И. Замятина // Смазки при трении и резании металлов. Иваново, сс. 45 – 50 (1986).
- [66] А.с. 1397479. МКИ С10М 177/00. Бюл. №19 (1988).
- [67] А.с. 932822. МКИ С10М 5/07. Бюл. №20 (1982).
- [68] М. Шалкаускас, А. Вашкялис. *Химическая металлизация пластмасс*. Химия, Ленинград, 168 с. (1972).
- [69] Г.В. Виноградов, Ю.Я. Подольский, М.Д. Безбородько. Использование машин с точечным контактом тел трения для оценки износа металлов, противоизносных и антифрикционных свойств смазочных материалов // Сб. «Методы испытания на изнашивание». Изд-во АН СССР, Москва, сс. 152 – 163 (1962).
- [70] Г.А. Сіренко, А.С. Смирнов. Критерии оценки смазочной способности масел на четырехшариковой машине трения // Сб. «Вопросы теории трения, износа и смазки». РИО Новочерк. политех. ин-та, Новочеркасск, **215**, сс. 38 – 42 (1969).
- [71] Р.В. Гриневиц, В.В. Цасюк, А.С. Смирнов. *Специализированные машины трения* // Применение синтетических материалов. Картя Молдовеняскэ. Кишинэу, сс. 33 – 36 (1975).
- [72] Г.О. Сіренко. Створення антифрикційних матеріалів на основі порошків термотривких полімерів та вуглецевих волокон: Дис. на здобуття наук. ступеня докт. технічних наук: спец. 05.16.06 – порошкова металургія та композиційні матеріали, Хмельницький технологічний ін-т. – Захищ. 8.12.1997 в Ін-ті проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАНУ – К., 1997. – 537 с.: іл., табл. – Бібліогр.: с. 432 – 451 (275 назв).
- [73] Г.О. Сіренко, О.В. Кузишин, М.М. Добровольська. Антифрикційні властивості мастильних плівок, утворених із водних розчинів K_2SiO_3 під час тертя та зношування сталі в точковому контакті // *Фізика і хімія твердого тіла*, **11** (2), сс. 469 – 483 (2010).

H.O. Sirenko¹, L.M. Soltys¹, M.B. Skladanyuk¹, N.I. Sabadakh¹, V.P. Svidersky²,
L.M. Kyrychenko², R.V. Pnytsky¹

Antifriction Properties of Plastic Lubricants Filled with Layered Compounds of Graphite, which Intercalated $FeCl_3$ and Plated Cu^0-Cu_2O-CuO or Cu^0-Cu_2O

¹Vasyl Stefanyk' Precarpathian National University, 57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76025, Ukraine

Tel. (0342) 77.64.15; (096) 813.93.53, e-mail: sirenkog@rambler.ru

²Khmelnitsky National University, 11, Instytutska Str., Khmelnytsky, 29016, Ukraine

The antifriction antiscuffing and antiwear properties of plastic lubricants based on mineral oil and synthetic fluids (polyglycol, ether of dibasic organic acid, threatomic alcohol, perfluoropolyether) filled with powders graphite intercalated compounds $C_x(FeCl_3)$ with and without copper plating of Cu^0-Cu_2O-CuO (for formaldehyde technology) and Cu^0-Cu_2O (for zinc technology) have been studied.

Key words: antifriction material, lubricant, graphite, intercalation, copper plating.