

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

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

Досліджено антифрикційні і в'язкісно-температурні властивості водних розчинів низькомодульного калієвого скла, нафтових та мінеральних олів, синтетичних рідин в точковому контакті чотирикульової машини тертя та на стенді кульового і роликів підшипників. Встановлено, що низькомодульне рідке скло надає сталним поверхням високих протизносних та протизадирних властивостей. Виявлений механізм мастильної дії рідкого скла, який полягає в полімеризації силікатів калію з утворенням колоїдних частинок та наступній їх агрегації до гелю, що відповідає різним ступеням навантаження.

Ключові слова: силікат калію, навантаження заїдання, антифрикційні, протизносні властивості, точковий контакт.

Стаття постуила до редакції 05.08.2009; прийнята до друку 15.03.2010.

Вступ

Встановлено [1], що тверді мастила можна наносити на поверхню металу, використовуючи водні розчини силікатів (рідке скло) як дисперсійні середовища. Після випаровування води силікати діють як ефективні зв'язуючі і мастильні матеріали. Такі тверді плівки на основі натрій силікату або його суміші з натрій тетраборатом [2] використовують як тверді мастила за високих температур (пресування сталі, молібдену, ніобію, титану та цирконію) [3]. Автори [4,5] звернули увагу на певні властивості рідкого скла та механізм тертя і зношування сталі при мащенні цією рідиною. Так як натрій силікат втрачає гігроскопічну воду за температури 135-155 °С, а за температури 500-700° С – гідратну воду, то слід очікувати, при певних режимах тертя, появи на поверхні твердих мастил на основі силікату гелю кремнезему. Це припущення дозволило використовувати рідке скло як мастильний матеріал і створити ряд рідких та пластичних мастил на його основі. Властивості водних розчинів силікатів металів обумовлені в'язкістю розчину та величиною силікатного модуля, який визначається як мольне співвідношення оксидів силіцію та металу

$$M_k = \frac{m(SiO_2)}{nMe_2O} \quad (1)$$

У розчинах низькомодульних силікатів металів з високою лужністю (силікатний модуль 2,0 і нижче) кремнезем існує переважно у вигляді частинок, що наближаються до йонних розмірів. Це дає підстави

вважати, що агрегативно-стійке мастило можна отримати з низькомодульного рідкого скла.

Водні розчини силікатів металів загального складу $nMe_2O \cdot mSiO_2 \cdot pH_2O$, де $Me \equiv Li, Na, K, Rb, Cs, Fr, NH_4$, та композиції на їх основі сумісно з водорозчинними органічними речовинами знову привернули увагу дослідників [6-21].

Органо-неорганічні полімерні композити (ОНК) проявляють характерні властивості обох складових композиту – органічної та неорганічної [6-12] та специфічні властивості, що пов'язані з формуванням у водному розчині нанорозмірної структури [13]. Один із таких композитів створений на основі уретанового олігомеру з вільними NCO-групами і водного розчину силікату натрію, механізм процесу синтезу та фізико-механічні властивості якого досліджені в [13, 19-21]. Але паралельні реакції та утворення побічних продуктів утруднює керування складним механізмом хімічних реакцій та, відповідно, властивостями органо-неорганічних композитів [16, 18]. За [12] на швидкість хімічних реакцій взаємодії органічних та неорганічних полімерів впливає будова аніона та катіона силікату та ізоціанатовмісних уретанів та їх молекулярна маса.

Тому, накопичення даних про властивості водних розчинів силікатів металів та їх композицій з органічними речовинами є нагальним для створення ефективних матеріалів зі спеціальними властивостями та визначення їх практичного застосування.

Метою даної роботи було дослідження в'язкісних та антифрикційних властивостей водних розчинів силікату калію з силікатним модулем $M_k = 0,75-1,45$.

I. Матеріали та методи дослідження

1. Синтез калій силікату проведено з калій гідроксиду КОН (ч.д.а.) та аеросилу SiO₂ (марки А-175) в дистильованій воді. Вязкість розчину задавали концентрацією калій силікату у воді.

2. Для порівняльної оцінки мастильної здатності рідкого скла проводили дослідження мінеральних і синтетичних олив:

а) нафтові оливи: Vitorex-334, Esso-Christo, 5350, НКМ-40, НКМ-40 (висока фракція), НКМ-70, НКМ-200, KPL-201, МГД-14М, Н-50, ХР-200, БМТ-15, Witco CL-1000, Witco CL-1200, Witco CL-1500, Risella-33 (SAE-40), Risella-17; **б) мінеральні оливи:** авіаційна МС-20, компресорна 12 (М), індустриальна-ИС-20, індустриальна ИС-45, вазелінова (медична); вазелінова для приладів; циліндрова 38; турбінне 22; **в) рослинна олива:** рицинова кислота; **г) гліцерин;** (ч.д.а.); **г) перфторполіетіленові рідини:** ПЕФ-240, ПЕФ-180, ПЕФ-130/110, ПЕФ-130/50; ПЕФ 70/60; **інші фторовані рідини:** хлорфторкарбонова №8; **д) полігліколеві рідини:** Orites-210DS (M = 2400), КСМ, кополімер оксидів етилену і пропілену №1 (ІНХП, м. Баку), кополімер оксидів етилену і пропілену №2 (ІНХП, м. Баку), статистичний кополімер оксидів пропілену та етилену (M = 1500), Статистичний кополімер оксидів пропілену та етилену Лапрол 2502-2-70 (M= 2500), Breox CL 660, Breox CL 1300, Breox CL 1400, Лапрол 202 (M = 200), Лапрол 602 (M = 600), Лапрол 1002 (M = 1000), Лапрол 2002 (M = 2000) (№1), Лапрол 2002 (M = 2000) (№2), Лапрол 503 (M = 500), Лапрол 3003 (M = 3000), Polyol LG-56 (M=3000), Лапрол 5003 (M = 5000), Syntheso D-201, Syntheso D-201 N, Syntheso D-202, Лапрол 3503-2-70, Лапрол 3503-2-65; **е) інші синтетичні рідини:** триетилгліколь, діоктиловий естер себацінової кислоти (діоктилсебацінат); низькомолекулярний поліетилен; полібутен-200, полі-α-олефінова, полі-α-олефінова + 4% полімеру СКЕП, СКТН-А, полібутен для сукцинімідних присадок (M = 860); полібутен «Тредкат-99» (M = 463); поліфеніловий етер 5Ф4Е; продукт ГПХА D-300; дибутилфталат; гліцерин (ч.д.а.); епоксидований бензилфенол (ЕБФ); епоксидований ксилілфенол (ЕКФ); хлорфторвуглеводнева №8, естер двоосновної кислоти «Андерол-500»; **є) поліорганосилоксанові рідини:** **полідиметилсилоксанові:** ПМС-10, ПМС-20, ПМС-100, ПМС-200, ПМС-500, ПМС-1000; **поліметилфенілсилоксанові:** ФМ-5,6 АП (вміст C₆H₅-груп ω = 5,8%); кополімер-5; кополімер-3 (ω = 33,6%); ПФМС-4 (ω = 50,5%); **поліметилдихлорфенілсилоксанова:** ХС-2-1; **поліметилтрифторпропілсилоксанова:** ФС-58; **полідіетилсилоксанові:** ПЕС-1, ПЕС-2, ПЕС-3, ПЕС-4, ПЕС-5, ПЕС-С-1.

3. Кінематичну в'язкість нафтових і мінеральних олив, синтетичних рідин та рідкого скла визначали за температури 293-373 К за допомогою вискозиметра ВПЖ-4,0 з діаметром капіляра 0,5-4,0 мм та термостату ТС-154.

4. Тертя та зношування сталі в присутності 0,75-1,45 модульного калієвого рідкого скла, нафтових і мінеральних олив та синтетичних рідин вивчали на чотирикульовій машині тертя (ЧКТМ) [22-35].

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.

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 притисним кільцем. Горішня кулька жорстко була зафіксована у спеціальному патроні на кінцівіці прямовисного валу [34,35].

Геометрія тетраедра (рис. 1) визначала значення лінійної швидкості у зоні контакту v , величину нормальної складової N_i на 1 кульку в теоретичній точці контакту осьової сили N на 3 кульки та момент тертя (коефіцієнт тертя μ) [33, 34]:

$$v = \frac{d \cdot \omega}{2} \cdot \sin \alpha = 0,576 \text{ pdn} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right], \quad (2)$$

$$N_i = \frac{N}{3 \cos \alpha} = 0,4086N \approx 0,41 \text{ [H]}, \quad (3)$$

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);

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{2rQ}{dNt\gamma\alpha},$$

де Q – сила, що згинала тензобалку;

F – сила тертя;

r – відстань від осі обертання верхньої кульки до точки дотику важеля з тензодавачем.

Випробування на навантажувальну здатність плівки мастильних олив проводили при 1140, 1470, 1495 обертів за хвилину горішньої кульки (частота $f=19 \text{ c}^{-1}$, $24,5 \text{ c}^{-1}$, $24,9 \text{ c}^{-1}$), що відповідало лінійній швидкості у зоні контакту $v=0,4384 \text{ м/с}$, $0,5628 \text{ м/с}$, $0,5723 \text{ м/с}$ відповідно.

При визначенні навантаження заїдання – критичного навантаження $N_{\text{кр}}$, при якому спостерігається підвищений знос сталі, – навантаження N змінювали ступенями від 100-200 Н до $N < N_{\text{кр}}$ та $N > N_{\text{кр}}$, а в ділянці $N=N_{\text{кр}}$ – через 10-25 Н. Кожний дослід тривав 1 хв. і проводився окремо з новою порцією мастила. ЧКТМ була обладнана тензометричним пристроєм і потенціометром КСП-4, що дозволяло перехід до $N_{\text{кр}}$, фіксувати за різким зростанням моменту тертя (коефіцієнта тертя). Температура мастильної оливи визначали за $\sim 2,5$ мм від зони контакту, яка в момент задиру становила $t \geq 363 \text{ К}$.

Таблиця 1

Характеристика кульової машини тертя

Ступінь	Швидкість обертання верхньої кульки (без навантаження)		Відносна швидкість ковзання поверхонь тертя кульок [м/с]				Середня швидкість ковзання в інтервалі навантажень 0-4500 Н, м/с
			при осьовому навантаженні, Н				
	об./хв.	м/с	500	1500	3000	4500	
1	610	0,2335	0,233	0,232	0,230	0,226	0,23
2	1520	0,5819	0,580	0,578	0,571	0,560	0,57
3	3500	1,3400	1,338	1,334	1,322	1,303	1,33

Таблиця 2

В'язкісно-температурні характеристики мінеральних олів, поліорганосилоксанів та калієвого рідкого скла ($M_k=1,25$)

Рідина	Середня молекулярна маса	В'язкість ν [сСт] за температури			$\chi = \frac{\nu_{323}}{\nu_{373}}$	Температурний коефіцієнт в'язкості в межах 293-373 К, сСт/К
		293 К	323 К	373 К		
Авіаційна олива МС-20	664	1249	157	20	7,85	15,4
Вазелінова медична олива	-	118	35,3	10(4)	3,53	1,54
Вазелінова олива технічна	270	20	7,4	2,3	3,13	0,22
Компресорна олива 12(М)	-	-	109,8(1)	11,5	-	1,79
Полідиметилсилоксанова:						
ПМС-10	-	10,5	6	3,2	1,88	0,09
ПМС-20	-	19	14,1	7,4	1,91	0,15
ПМС-100	2600	102	45	20	2,25	1,03
ПМС-200	-	198	107	50,8	2,11	1,84
ПМС-500	-	503,8	280	110	2,55	4,92
ПМС-1000	-	1049	750	380	1,97	8,36
Поліметилфенілсилоксанова*:						
ФМ-5, 6АП	1400	21,7	12,5	5,3	2,36	0,21
Кополімер-5	-	71,3	-	10	-	0,77
Кополімер-3	2510	380(270)	(112,3)	(43,5)	2,58	2,83
ПФМС-4	1490	639	-	28	-	7,64
Поліметилдихлорфеніл-силоксанова ХС-2-1	-	45,4	-	8	-	0,47 (0,24 в інтервалі 293-473 К)
Полфметилтрифторпропіл-силоксанова ФС-58	-	1278	-	149	-	14,1
Полідіетилсилоксанова:						
ПЕС-1	-	3,2	-	1,1(3)		0,04
ПЕС-2	-	11,1	-	2,62(3)		0,14
ПЕС-3	-	16,4	-	4,36(3)		0,20
ПЕС-4	-	45,9	-	16,8(2)		0,73
ПЕС-5	-	267,2	-	86,6(2)		4,52
ПЕС-С-1	1480	220,4	-	-	-	-
Калієве рідке скло ($M_k=1,25$)			7-100			

* Вміст C_6H_5 -груп у поліметилфенілсилоксанах: ФМ – 5,6АП – 5,8%; кополімер-3 – 33,6%; ПФМС-4 – 50,5%. (1) 318 К; (2) 333 К; (3) 353 К; (4) 363 К.

Початковий p_0 та у кінці випробування p_k тиски у зоні контакту, що витримувала мастильна плівка, розраховували за [34]:

$$p_0 = N_i / \frac{\pi d_r^2}{4}; \quad (4)$$

$$p_k = N_i / \frac{\pi d_3^2}{4}, \quad (5)$$

де d_3 – діаметр плями зношування для однієї кульки;

d_r – діаметр плями пружної деформації за Герцем, розрахований за формулою [34], для однієї кульки:

$$d_r = 1,76 \sqrt[3]{\frac{N_i \cdot d}{2E}} = 0,040948 \sqrt[3]{N} [\text{мм}], \quad (6)$$

де $E=206010[\text{Н/мм}^2]$ – модуль пружності Юнга сталі ШХ-15, N_i, N в [Н], d в [мм].

Оцінку протизношувальних властивостей мастильних плівок здійснювали також за діаметром плями зносу при $N=200$ Н ($N_i=82$ Н) для нафтових і мінеральних олів та синтетичних рідин, а для рідкого скла при $N=294$ Н ($N_i=120$ Н) за 60 с та 4 год. випробувань, температура за $\sim 2,5$ мм від зони контакту, що визначена термопарою ХК і вторинним приладом – потенціометром КСП-4, становила 318 ± 5 К за 1-4 год. випробувань.

Характеристика чотирикульової машини тертя зведена в табл. 1.

II. Результати та обговорення

1. В'язкісно-температурні властивості.

Порівняльні в'язкісно-температурні характеристики мінеральних олів, поліорганосилоксанів та калієвого скла ($M_k = 1,25$) приведені в табл. 2. Як видно з табл. 2, навіть для низького силікатного модуля калієвого рідкого скла кінематична в'язкість близька до в'язкості

мінеральних олів та поліорганосилоксанів і може коливатися в широких межах, але температурне співвідношення в'язкостей та температурний коефіцієнт в'язкості наближаються для низьков'язких і різко відрізняються для високов'язких рідин для всіх трьох видів мастил.

2. Протизадирні та протизносні властивості в точковому контакті

У табл. 3 наведені результати оцінки мастильної здатності калієвого рідкого скла (силікатний модуль 1,25), мінеральних олів (авіаційної МС-20 та турбінної 22), рицинової олії, триетиленгліколю та диоктилсебацінату.

Як видно з даних табл. 3, на протизадирні і протизносні властивості впливає природа мастильного матеріалу. Рідке скло переважає мінеральні та синтетичні оливи як за навантажувальною здатністю, так і за прозносними властивостями (дуже розбавлені розчини рідкого скла ефективно захищають поверхню тертя від зносу при тривалих дослідженнях). Так, критичне навантаження, яке витримує рідке скло (в'язкість 100 сСт за температури 323 К) становить 2620 Н, а для мінеральної оливи МС-20 (з в'язкістю такого ж порядку) це навантаження дорівнює 600 Н. При тривалих дослідженнях мастильних матеріалів кращі результати отримані для високов'язкого рідкого скла: коефіцієнт тертя після припрацювання дещо знизився, від 0,03 до 0,02 (для рідкого скла з в'язкістю 60 сСт за температури 323 К); знос при осьовому навантаженні 294 Н за 4 год. склав 0,6 мм; протягом всього часу дослідження ковзання було плавним. Для мінеральної оливи МС-20 за цих же умов плавне ковзання через 4-7 хв. досліджень перейшло в стрибкоподібне, переривчасте, при цьому коефіцієнт тертя підвищився від 0,08 до 0,11-0,12; знос за 4 год. склав 0,95 мм. Низьке тертя в присутності рідкого скла, як видно з даних табл. 3, визначає і порівняну низьку температуру мащення в об'ємі при сталому режимі тертя.

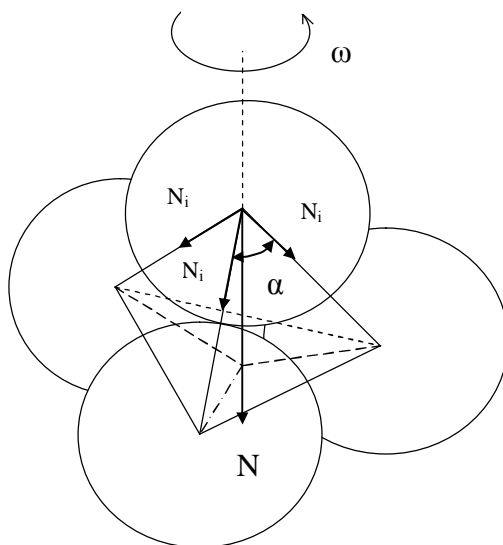


Рис. 1. Схема чотирикульового контакту.

Таблиця 3

Порівняльна оцінка антифрикційних властивостей мінеральних та рослинних олів, синтетичних рідин та рідкого силікатного скла

Мастильний матеріал	В'язкість за 323 К, сСт	Протизадирні властивості ($\nu=0,5723$ м/с; $n=1495$ об/хв.; $f=24,9$ с ⁻¹)			Протизносні властивості ($\nu=0,5723$ м/с; $n=1495$ об/хв.; $f=24,9$ с ⁻¹)			
		Тривалість досліджень – 1 хв. (критичні умови)			Тривалість досліджень – 4 год. (осьове навантаження $N = 294$ Н; $N_i = 120$ Н)			
		Критичне навантаження N_i , Н	Діаметр плями зносу [мм] перед задиром	Коефіцієнт тертя перед задиром	Діаметр плями зносу, мм	Початковий коефіцієнт тертя (1 хв.)	Коефіцієнт тертя при сталому режимі	Температура мастила в об'ємі при сталому режимі, К
Калієве рідке скло (модуль 1,25)	100	1050	0,63	0,02	0,54	0,04	0,03	308
	60	722	0,56	0,02	0,60	0,03	0,02	301
	25	573	0,54	0,02	0,67	0,02	0,02	298
	7	140	0,42	0,02	0,83	0,02	0,02	296
Авіаційна олива МС-20	157	241	0,47	0,08	0,95	0,08	0,11-0,12	343
Турбінна олива 22	22	192	0,45	0,09	1,10	0,09	0,11-0,12	343
Рицинова олія	125	333	0,52	0,06	0,97	0,07	0,07	318
Триетиленгліколь	-	297	0,49	0,07	0,78	0,08	0,10-0,11	338
Діоктилсебадинат	-	305	0,60	0,08	1,08	0,08	0,09-0,10	329

Таблиця 4

Зношування підшипників при мащенні вуглеводневими та на основі рідкого скла пластичними мастилами

Мастильний матеріал	Втрата маси кулькового підшипника (вальниці) №326705К, мг	Втрата маси роликів підшипника (вальниці) №7305, мг
Рідке скло (модуль 1,5)	198	420
Рідке скло, що загущене милами синтетичних жирних кислот	138	175
Рідке скло, що загущене газовою чаддю	140	510
Рідке скло, що загущене милами стеаринової кислоти	105	152
Солідол УС-1	120	370

Таблиця 5

Вплив тривалості тертя та зношування на антифрикційні властивості

Осьове навантаження, Н	Тривалість досліджень (умови див. табл. 3)			
	1 хв.		15 хв.	
	Діаметр плями зносу, мм	Початковий коефіцієнт тертя	Діаметр плями зносу, мм	Коефіцієнт тертя при сталому режимі
500	0,41	0,03	0,42	0,03
1000	0,51	0,02	0,54	0,02
1500	0,58	0,02	0,61	0,02
2000	0,94	0,09	1,05	0,07
3000	1,08	0,07	1,18	0,06
4500	1,20	0,06	1,28	0,05
6000	1,33	0,06	1,40	0,05

Таблиця 6

Навантажувальна здатність та протизносні властивості нафтових, мінеральних та рослинних олив, синтетичних рідин та поліорганосилоксанів при випробуваннях на чотирикульовій машині тертя

Оливи	Навантажувальна здатність		Протизносні властивості	
	v (363 К), $\times 10^{-6}$ м ² /с	Критичне навантаження N_i , Н	v (318 К), $\times 10^{-6}$ м ² /с	d , мм ****
<i>Нафтові</i>				
Vitorex-334	11,3	238	49,7	0,60
Esso-Christo 5350	10,6	213	53,8	0,69
НКМ-40	11,9	205	52,5	0,55
НКМ-40	10,7	203	47,8	0,66
НКМ-40 (висока фракція)	15,9	201	83,2	0,46
НКМ-70	15,9	203	83,2	0,46
НКМ-200	10,6	226	80	0,82
KPL-201	15,4	185	89	0,87
МГД-14М	13,6**	349	-	0,54
Н-50	-	213	-	0,60
XP-200	-	205	45,1****	0,50
БМТ-15	-	175	-	0,96
Witco CL-1000	23	190	143	0,45
Witco CL-1200	26	195	184	0,46
Witco CL-1500	29,5	220	215	0,46
Risella-33 (SAE-40)	10,4	199	49,1	0,65
Risella-17	4,2	164	12,3	0,93
<i>Мінеральні</i>				
Авіаційна МС-20	(20)**	281	414(1249)*	0,57
Компресорна 12 (М)	19,4(11,5)**	278	109,8	0,92
Індустріальна ІС-20	9,2	242	32,6(842)*	1,07
Індустріальна ІС-45	-	209	-	0,85
Вазелінова (медична)	10,0	201	44,6(118)*	0,65
<i>Перфторполіефірні</i>				
ПЕФ-240	29,7	1476	123(420,8)*	0,53
ПЕФ-180	-	1107	(289)*	0,54
ПЕФ-130/110	6,31	902	19,1(41,6)*	0,48
ПЕФ-130/50	3,14	718	9,2(23,1)*	0,60
ПЕФ-70/60	1,72	677	4,1(8,38)*	0,58
<i>Полігліколеві</i>				
Orites-210DS (M = 2400)	59,0	447	237,3	0,64
КСМ	61,0	398	232	0,77
Кополімер оксидів етилену і пропілену №1 (ІНХП, м. Баку)	7,6**	246	29****	0,49
Кополімер оксидів етилену і пропілену №2 (ІНХП, м. Баку)	36,1**	256	208****	0,56
Статистичний кополімер оксидів пропілену та етилену (M = 1500)	-	361	-	0,73
Статистичний кополімер оксидів пропілену та етилену Лапрол 2502-2-70 (M= 2500)	60	402	230	0,68
Breox CL 660	-	287	-	0,80
Breox CL 1300	-	328	-	0,63
Breox CL 1400	-	369	-	0,66

Оливи	Навантажувальна здатність		Протизносні властивості	
	ν (363 К), $\times 10^{-6}$ м ² /с	Критичне навантаження N_i , Н	ν (318 К), $\times 10^{-6}$ м ² /с	d, мм ****
Лінійні пропіленгліколі:				
Лапрол 202 (М = 200)	4,3	238	19,8	0,62
Лапрол 602 (М = 600)	8,4	242	35,3	0,53
Лапрол 1002 (М = 1000)	-	246	-	0,51
Лапрол 2002 (М = 2000) (№1)	40,5	238	163,3	0,62
Лапрол 2002 (М = 2000) (№2)	40,8	262	163,5	0,49
Розгалужені пропіленгліколі на основі гліцерину				
Лапрол 503 (М = 500)	12,3	226	76,6	0,58
Лапрол 3003 (М = 3000)	41,8	308	175,5	0,41
Polyol LG-56 (М=3000)	41,8	320	175	0,52
Блоккополімер оксидів пропілену та етилену				
Лапрол 5003 (М = 5000)	-	349	-	0,49
Syntheso D-201	62	287	245	0,61
Syntheso D-201 N	62,2	370	262	0,56
Syntheso D-202	57,9	451	265	0,67
Лапрол 3503-2-70	-	287	-	0,71
Лапрол 3503-2-65	-	254	-	0,44
<i>Синтетичні</i>				
Низькомолекулярний поліетилен	172,3	320	13842	0,47
Полібутен для сукцинімідних присадок (мол. маса 860)	374(288)**	320	5839	0,45
Поліфеніловий ефір 5Ф4Е	24,6	303	234,2	0,74
Д-3000 (ДПХ)	54,1	283	217,4	0,59
Дибутилфталат	2,7	281	7,6	1,03
Полібутен-200	-	267	-	0,70
Полі- α -олефінова	35,8**	287	235***	0,61
Полі- α -олефінова + 4% полімеру СКЕП	39,1**	277	258***	0,61
СКТН-А	-	267	-	0,88
Рицинова	40	279	254,1	0,66
Гліцерин (ч.д.а.)	15,6	275	129	0,64
Епоксидований ксилілфенол ЕКФ	4,51	246	19,9	0,51
Епоксидований бензилфенол ЕБФ	3,7	246	14,2	0,52
Хлорфторвуглеводнева №8	-	246	-	0,73
Ефір двоосновної кислоти «Андерол-500»	12,1	242	67,8	0,92
Полібутен Тредкат-99	(53,7)**	201	1074	0,45
Поліорганосилоксани:				
Поліметилтрифторпропілсилоксан ФС-58	220(149)**	245(1); 642 (2)	620(1278)*	0,51
Полідиметилсилоксан ПМС-500	133(110)**	-	315(503,8)*	0,71
Поліметилдихлорфенілсилоксан ХС-2-1	9,2(8)**	318	200 (45,4)*	0,84
Полідіетилсилоксан ПЕС-С-1	-	-	(220,4)*	2,0
Поліметилфенілсилоксан кополімер-5	124	-	285	3,2

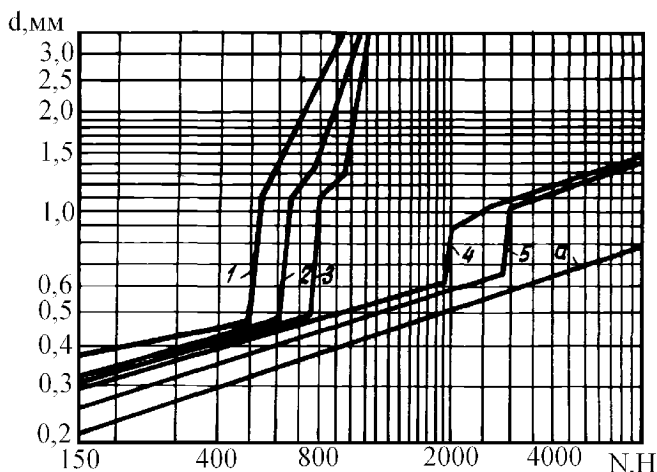


Рис. 2. Залежність зношування кульок зі сталі ШХ-15 (d) від осевого навантаження (N) мінеральних олиव та калієвого рідкого скла: а – лінія пружної деформації за Герцем; 1 – індустріальна олива ІС-20; 2 – авіаційна олива МС-20; 3 – циліндрова олива 38; 4 – технічне рідке скло; 5 – одномодульне калієве рідке скло високої чистоти (4,5 з в'язкістю 140 сСт) (ЧКМТ; $\tau = 1$ хв.; $\nu = 0,5723$ м/с).

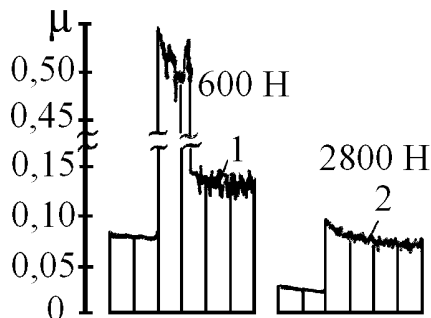


Рис. 3. Трибограми випробувань ($\tau = 1$ хв.) на навантажувальну здатність авіаційної оливи МС-20 (1) ($N = 600$ Н) та одномодульного рідкого калієвого скла високої чистоти з в'язкістю 140 сСт (2) ($N = 2800$ Н).

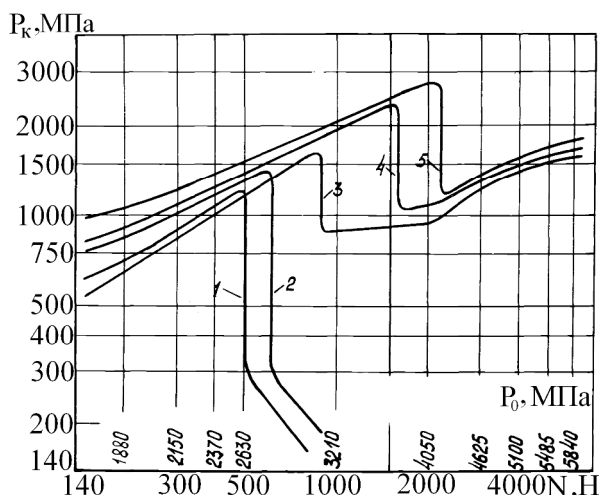


Рис. 4. Залежність кінцевого питомого навантаження (тиску) P_k від навантаження N та початкового питомого навантаження (тиску за Герцем) P_0 при випробуваннях кульок із сталі ШХ-15 на ЧКМТ ($\tau = 1$ хв.) для рідин: 1 – олива ІС-20; 2 – олива МС-20; 3 – одномодульне калієве рідке скло з в'язкістю 20 сСт (за температури 323 К); 4 – одномодульне калієве рідке скло з в'язкістю 60 сСт (за температури 323 К); 5 – одномодульне калієве рідке скло з в'язкістю 100 сСт (за температури 323 К) (ЧКМТ; $\tau = 1$ хв.; $\nu = 0,5723$ м/с).

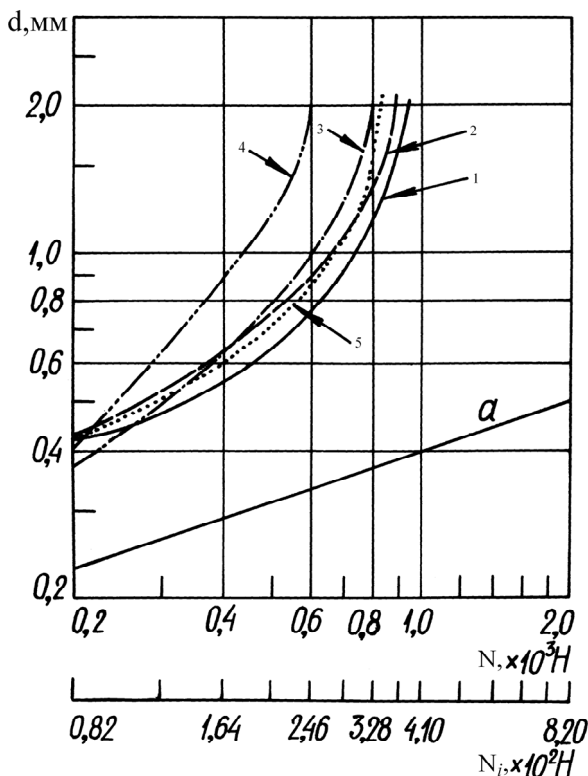


Рис. 5. Залежність діаметра плями зносу (d) кульок із сталі ШХ-15 від осевого навантаження (N) та нормального навантаження на 1 кульку (N_i) при мащенні поліорганосилоксанами: 1 – полідиметилсилоксаном ПМС-500; 2 – полідиметилсилоксаном ПМС-200; 3 – полідіетилсилоксаном ПЕС-С-1; 4 – поліметилфенілсилоксаном ПФМС-4; 5 – поліметилфенілстлоксаном Кополімер-5 (ЧКМТ; $\tau = 1$ хв.; $n = 1140$ об./хв.; $f = 19$ с $^{-1}$; $\nu = 0,4364$ м/с).

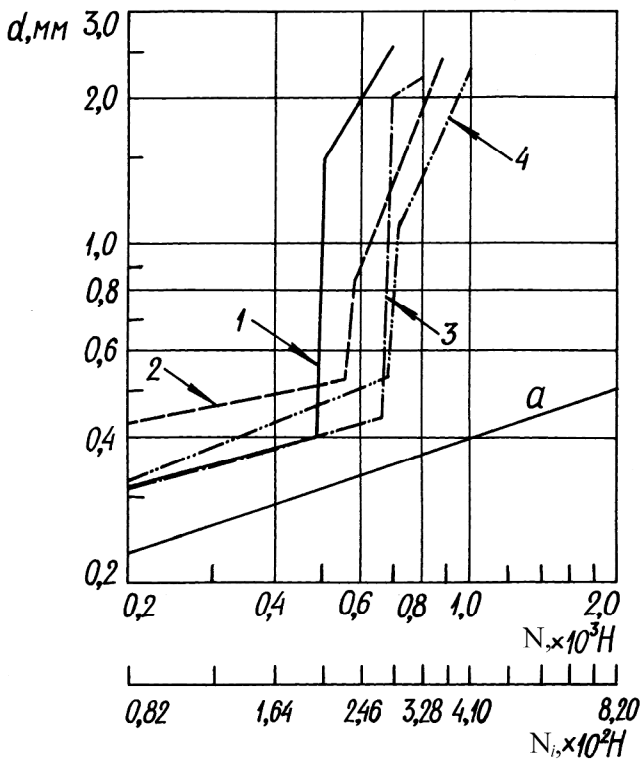


Рис. 6. Залежність діаметра плями зносу (d) кульок із сталі ШХ-15 від осьового навантаження (N) та нормального навантаження на 1 кульку (N_i) при мащенні мінеральними оливами: 1 – вазелінова медична; 2 – індустріальна ІС-20; 3 – компресорна 12 (М); 4 – авіаційна МС-20 (ЧКМТ; $\tau = 1$ хв.; $n = 1140$ об./хв.; $f = 19$ с $^{-1}$; $v = 0,4364$ м/с).

Для мінеральних олив неможливо однозначно говорити про вплив в'язкості на зношування, так як важко приготувати оливи близького хімічного складу, але з різною в'язкістю. Для рідкого скла є можливість прослідкувати за зміною протизносних та антифрикційних властивостей в залежності від в'язкості, змінюючи тільки кількість води у рідкому склі і залишаючи сталим його силікатний модуль [36]. На рис. 2 приведена залежність зносу від осьового навантаження мінеральних олив і рідкого калієвого скла (модуль 1,0). Прямая **а** відображає лінію пружної деформації за Герцем. До навантажень $N=500-750$ Н під час тертя кульок на мінеральних оливах (криві 1, 2, 3) знос невеликий, але як тільки мастильний шар руйнується, знос різко збільшується. Навантаження заїдання для індустріальної оливи ІС-20 (крива 1) становить $N=500$ Н, для авіаційної МС-20 (крива 2) $N=600$ Н, а для циліндрової 38 (крива 3) $N=750$ Н. Крива 5 відповідає одномодульному калієвому рідкому склу з в'язкістю 140 сСт за температури 323 К. При терті в присутності цього силікату схоплення поверхонь не спостерігалось до 2800 Н; знос – діаметр плями зносу – на нижніх кульках при цьому склав 0,63 мм.

Критичні умови тертя в присутності мінеральних олив характеризуються високим коефіцієнтом тертя (0,48-0,55) (крива 1, рис. 3), потім умови тертя, завдяки припрацюванню поверхонь, полегшувались і коефіцієнт тертя знижувався до 0,14. Для рідкого скла

високої чистоти при навантаженні 2800 Н коефіцієнт тертя зростає від 0,02 до 0,09, потім плавно знижувався до 0,07 і наступала стабілізація процесу тертя (крива 2, рис. 3).

Критичне навантаження для технічного рідкого скла (крива 4, рис. 2), порівняно з чистим (крива 5, рис. 2) однакової в'язкості, має такий же порядок, хоча зміщене в сторону менших навантажень ($N=2000$ Н). Ймовірно, домішки, які містяться в технічному склі, негативно впливають на стабільність мастила, структуру і швидкість утворення продуктів взаємодії поверхонь тертя і рідкого скла.

Для мінеральних олив заїдання має катастрофічний характер і при подальшому підвищенні навантаження закінчується зварюванням кульок. При терті в присутності рідкого скла заїдання не має катастрофічного характеру, а стає виродженням. Знос при навантаженні 3000 Н дорівнює 1,06 мм. При подальшому підвищенні навантаження, аж до 7500 Н, спостерігається незначний відносний знос (криві 4 і 5 рис. 2 паралельні до лінії Герца).

Як видно з рис. 2, рідке скло проявляє несучу здатність і при навантаженнях, при яких відбувається зварювання кульок в присутності мінеральних олив (2000-3800 Н). Зварювання кульок при мащенні індустріальною оливою було досягнуте при осьовому навантаженні 2780 Н.

На рис. 4 приведена залежність кінцевого тиску від осьового навантаження (начального тиску в місці контакту) для оливи ІС-20 (крива 1), оливи МС-20 (крива 2) і одномодульного калієвого рідкого скла з в'язкістю за температури 323К: 20 сСт (крива 3), 60 сСт (крива 4) і 100 сСт (крива 5). Із рис. 4 видно, що мінеральні оливи витримують початковий тиск 2600-2700 МПа, рідке скло 3100 МПа, 3700 МПа і 4200 МПа (для силікатів з в'язкістю за температури 323 К – 20, 60 і 100 сСт відповідно). До критичних умов з підвищенням навантаження питомі тиски збільшуються за однаковим законом і для мінеральних олив, і для рідкого скла.

За Лістовим [22] критерій придатності мастильних матеріалів при випробуваннях на ЧКМТ сформульований так: мастило повинне витримувати початковий статичний тиск $P_0 \geq 2000$ МПа, кінцевий тиск (після критичного навантаження) повинен усталитися в межах $P_k \geq 150$ МПа.

З підвищенням в'язкості несуча здатність рідкого скла підвищується і критичне навантаження зміщується в сторону високих тисків.

З підвищенням навантаження до певної величини, яка властива для кожного мастильного матеріалу, відбувається різке зменшення кінцевого тиску. При цьому величина перепаду тиску для мінеральних олив набагато більша (від $P_k = 1200-1400$ МПа до 300-320 МПа; далі до 150-190 МПа), ніж для рідкого скла (від $P_k = 1520-2900$ МПа до 900-1250 МПа; і далі підвищується до 1510-1840 МПа). Характер зміни значення цього тиску для рідкого скла і мінеральних олив різний. Криві 3, 4, 5 (рис. 4) після критичного навантаження знаходяться в вузькому інтервалі. Це говорить про те, що при терті в присутності рідкого скла після критичних навантажень на поверхні металу утворюється плівка однакової природи.

3. Протизносні властивості

Для використання в реальних вузлах тертя в якості мастильних рідин найкращим є рідке скло з модулем від 1 до 2 і концентрацією силікату 45-65% в залежності від необхідної в'язкості. Мастильну рідину готували із рідкого скла з додаванням до 10% триатомних спиртів як модифікатора структури мастил, 1% миль синтетичних жирних кислот (зниження поверхневого натягу рідкого скла) і 1-2% інгібітора лужної корозії металу (дубильні речовини, дифеноли, фосфати, нітрили). Пластичне мастило на основі рідкого скла отримували загущенням даної рідини органічними та мінеральними загущувачами. Одержані мастила мали penetрацію 240-320 і температуру краплепадіння 333-393K.

Вплив рідкого скла і пластичних мастил на його основі на величину і швидкість зношування деталей підшипників кочення досліджували на спеціальному стенді в підшипниках кочення двох типів – кульковому № 326705K і роликовому № 7305. Дослідження проводили при швидкості обертання внутрішнього кільця підшипника 1500 об/хв. і осьовому навантаженні 2500 Н протягом 200 год. Знос підшипників кочення оцінювали ваговим методом (табл. 4).

Найбільш інтенсивно в умовах досліду зношувались зовнішнє кільце і сепаратор підшипника. При мащенні рідким склом і мастилами на його основі задири, подряпини і піттинг на доріжках і тілах кочення були відсутні.

4. Механізм мастильної дії калій силікату

Частинно йонний характер силоксанового зв'язку Si-O наближає поліорганосилоксани (ПОС) до неорганічних сполук з чисто йонним характером. Полімерна молекула ПОС має будову, яка аналогічна до будови неорганічних силікатів [37, 38], в тому числі і до рідкого скла [39]. Дослідження [40] показали, що ПОС, які містять 57-62% SiO₂, адсорбуючись на металічних поверхнях, утворюють полімерні плівки, які при терті в результаті термомеханічної дії збіднюються органічними радикалами. Поверхневі шари сталі насичуються SiO₂, яка дає з оксидами Феруму силікати і силіциди феруму і тверді розчини кремнезему в оксидах феруму. Таке модифікування поверхні тертя супроводжується утворенням шару підвищеної твердості без м'якого покриття, що різко погіршує умови тертя (під час дослідження ПОС на чотирикульовій машині тертя при швидкості ковзання 0,23 м/с і температурі 323 K в інтервалі осьових навантажень 400-1200 Н коефіцієнт тертя становив 0,25-0,55). Дійсно, як видно з табл. 6 та рис. 5-7, випробування нафтових, мінеральних та рослинних олив, синтетичних рідин та поліорганосилоксанів на ЧКМТ на навантажувальну здатність та протизносні показники показали, що ПОС мають N_{кр.}, що близьке до тертя без мащення (рис. 5) та знос d = 0,71-3,20 мм за 4 год. випробувань, що відрізняє ПОС від мінеральних олив: вазелінової медичної (N_i = 201 Н); індустриальної ІС-20 (N_i = 242 Н); компресорної 12(М) (N_i = 278 Н) та авіаційної МС-20 (N_i = 281 Н) (рис. 6). Лише для хлорованого ПОС ХС-2-1 N_i = 317 Н, d = 0,84 мм та фторованого ПОС ФС-58 N_i = 245 Н (1), N_i = 642 Н (2), d = 0,51 мм (рис. 7). При введенні 3-7% ПОС у мінеральну оливу спостерігається вироджене

заїдання, яке супроводжується низьким коефіцієнтом тертя (0,08-0,09) та зносом. Такий синергізм мастильної дії суміші ПОС і мінеральних олив автори [40] пояснюють утворення на поверхні тертя твердого підшару із ферум силікатів з м'яким покриттям. Суміш ПОС з мінеральною оливою в деякій мірі може бути модельним мастильним середовищем для сталі для рідкого скла.

Ефективність мастильної дії рідкого скла можна пояснити як здатністю його колоїдних частинок адсорбуватися на поверхні металу, так і хімічною взаємодією з металом або оксидами, які покривають поверхню. Під час тертя в зоні контакту завжди є достатній запас енергії для протікання (за певних умов) хімічних реакцій, в результаті яких попереджається схоплення і зварювання мікрівиступів при їх стиканні.

Низькомодульне рідке скло енергійно реагує з поверхнею металу [36, 39]. Гідратовані в лужних

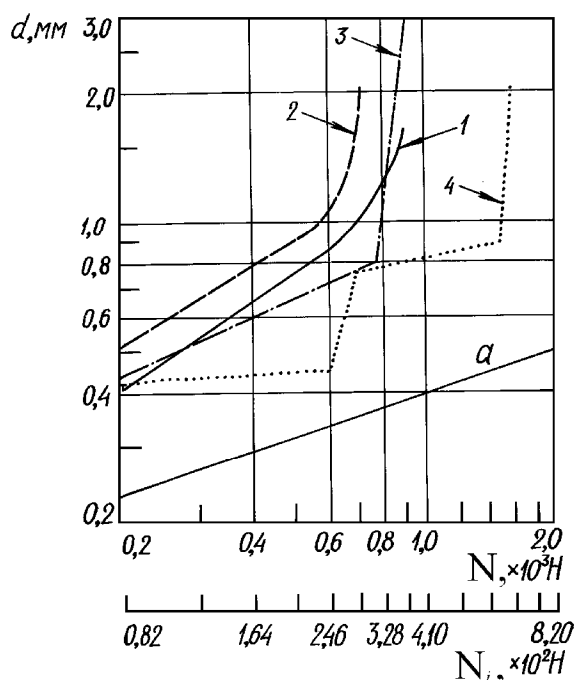
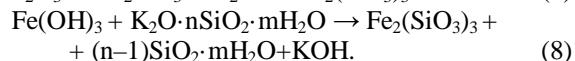
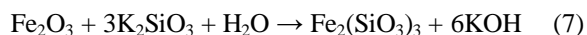


Рис. 7. Залежність діаметра плями зносу (d) кульок із сталі ШХ-15 від осьового навантаження (N) та нормального навантаження на 1 кульку (N_i) при мащенні поліорганосилоксанами:

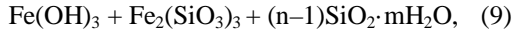
- 1 – полідиметилсилоксаном ПМС-1000;
 - 2 – полідиметилсилоксаном ПМС-5;
 - 3 – поліметилдихлорфенілсилоксаном;
 - 4 – поліметилтрифторпропілсилоксаном ФС-58
- (ЧКМТ; τ = 1 хв.; n = 1140 об./хв.; f = 19 с⁻¹; υ = 0,4364 м/с).

розчинах рідкого скла оксиди Феруму, взаємодіючи з лужними силікатами, утворюють силікати Феруму. Так як в продуктах реакції можуть утворюватися декілька різних комплексних силікатів феруму [36, 39], то процес взаємодії можна представити схематично:



За Айлером [39] при цьому утворюється колоїдна суміш, яку можна розглядати як адсорбцію йонів

металу на колоїдній частинці кремнезему або як сумісну коагуляцію позитивно зарядженого колоїдного ферум (III) гідроксиду та негативно зарядженого колоїдного кремнезему. Ферум (III) силікат також осаджується у вигляді драглевої аморфної маси. Таким чином, на поверхню металу, яка покрита твердою тонкою плівкою ферум (III) силікату, випадає м'який адсорбційно-колоїдний осад:



який істотно змінює властивості сталейних поверхонь під час тертя в рідкому склі.

Залежність діаметра плями зносу від осевого навантаження для рідкого скла (модуль 1,0) представлена на рис. 8 (крива 1 – для кінематичної в'язкості за 323 К 20 сСт; крива 2 – 60 сСт; крива 3 – 100 сСт; крива 4 – 140 сСт, крива а – лінія пружної деформації за Герцем). Як видно з рис. 8, протизносні властивості рідкого скла залежать від в'язкості, тобто від вмісту силікату в розчині (значне зниження зносу при переході від малов'язких до високов'язких силікатів). До настання схоплення поверхонь тертя критичне навантаження, яке витримує граничний шар рідкого скла із в'язкістю 20 сСт за 323 К, становило $N=900$ Н, 60 сСт – 1600 Н, 100 сСт – 2250 Н, 140 сСт – 2800 Н.

При підвищенні модуля рідкого скла його мастильна плівка здатна витримувати ще більші навантаження (рис. 9). На рис. 9 представлена залежність критичного навантаження від силікатного модуля рідкого скла (позначення ті ж, що і на рис. 8). Як видно з рис. 9, в залежності від модуля і концентрації силікату в розчині рідкого скла порізнному формується і підтримується граничний шар поверхонь тертя (як до критичного навантаження, так і після). У табл. 5 представлена залежність діаметра плями зносу від тривалості досліджень рідкого скла (модуль 1,20, в'язкість за 323 К 80 сСт). При цьому низький знос зберігається в часі для всього інтервалу навантажень, що говорить про стійкість граничного силікатного шару при підвищених навантаженнях і температурах.

На рис. 10 приведена залежність коефіцієнта тертя від осевого навантаження при встановленому режимі роботи (після 45-60 с від початку тертя) (поз. див. рис. 8).

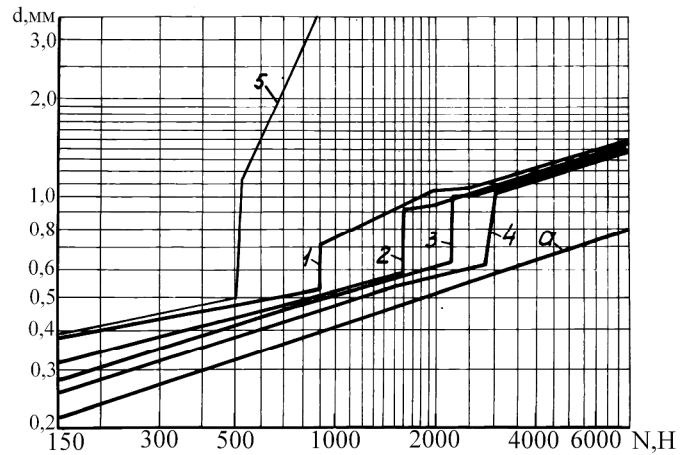


Рис. 8. Залежність діаметра плями зносу кульок зі сталі ШХ-15 (d) від осевого навантаження (N) при мащенні індустріальною оливою ИС-20 (5) та одно модульним калієвим рідким склом з кінематичною в'язкістю при 323 К в сСт: 1 – 20; 2 – 60; 3 – 100; 4 – 140; а – лінія пружної деформації за Герцем (ЧКМТ; $\tau = 1$ хв.; $v = 0,5723$ м/с).

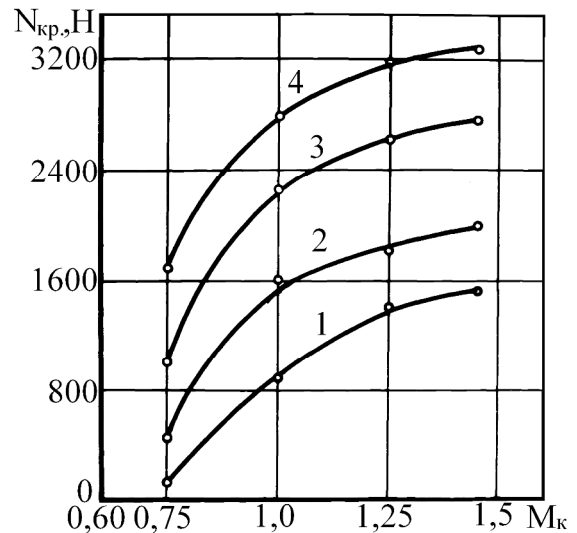


Рис. 9. Залежність критичного навантаження ну кульки зі сталі ШХ-15 від силікатного модуля рідкого скла M_k та в'язкості розчину силікату при 323 К в сСт: 1 – 20; 2 – 60; 3 – 100; 4 – 140.

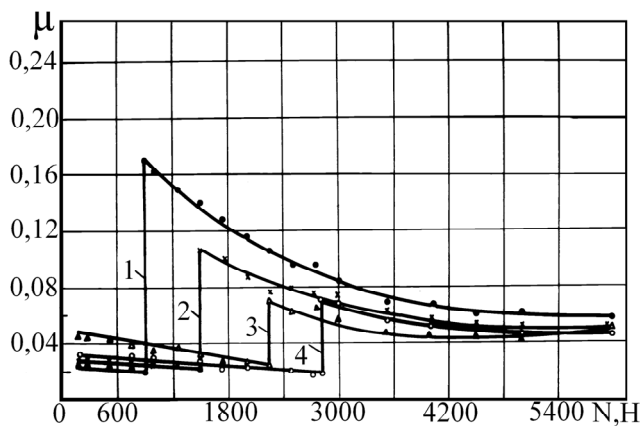


Рис. 10. Залежність коефіцієнта тертя від осевого навантаження при сталому режимі роботи (після 45-60 с від початку тертя) (ЧКМТ при мащенні кульок зі сталі ШХ-15 рідким склом (модуль 1,0)) (поз. див. рис. 8).

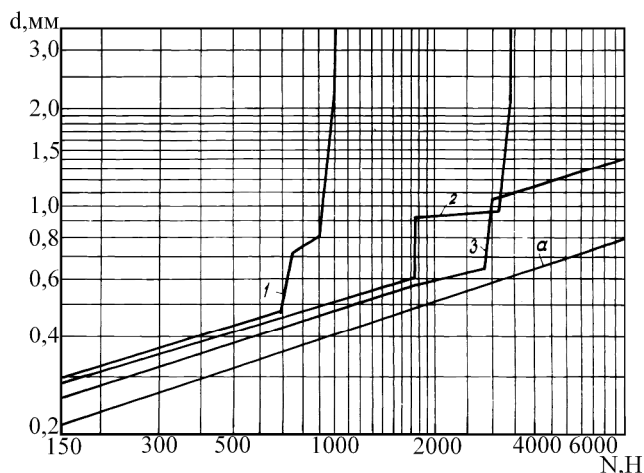


Рис. 11. Залежність діаметра плями зносу від осевого навантаження на кульки зі сталі ШХ-15 (при випробуванні на ЧКМТ) при мащенні: 1 –90%-ним концентратом гліцерину; 2 – сумішшю одномодульного калієвого рідкого скла з в'язкістю (за 323 К) 85 сСт + 15% мас. гліцерину (в'язкість суміші 100 сСт); 3 – для одномодульного рідкого скла з в'язкістю 140сСт за 323 К.

Як видно з рис. 10, збільшення концентрації силікату в розчині приводить до зниження коефіцієнта тертя при критичному навантаженні. У всіх випадках (до і після критичного навантаження) спостерігались низькі коефіцієнти тертя, що говорить про відсутність схоплення саме металічних точок контакту під час і після заїдання.

Порівняння трибодіаграм тертя, що отримані для а) рідкого скла (модуль 1,0, в'язкість 100 сСт); б) суміші 75% мас. рідкого скла (модуль 1,0) і 15% мас. гліцерину (90%-ний концентрат), в'язкість суміші 100 сСт; в) рідкого скла (модуль 1,0, в'язкість 20 сСт) показало, що до критичних навантажень коефіцієнт тертя дорівнював 0,02-0,03 для рідкого скла різної в'язкості, при критичних навантаженнях він незначно підвищувався, з підвищенням навантаження коефіцієнт тертя зменшувався, хоча характер процесу тертя

зберігався.

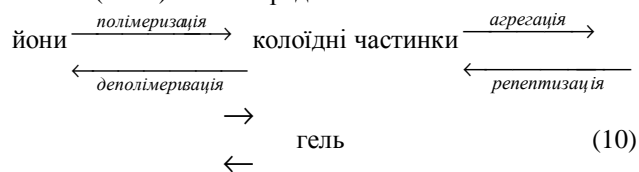
Так як гліцерин, розчиняючись в рідкому склі, не викликає його коагуляції [36, 39] і, крім того, фізично подібний до дисперсійного середовища (води) рідкого скла та моносилікатної кислоти [39] (яка в лужних розчинах перетворюється в моно- і дисилікатні йони), то вплив гліцерину, розчиненого в рідкому склі, на тертя та знос сталі представляє певний науковий інтерес.

На рис. 11 представлена залежність діаметра плями зносу від осевого навантаження (крива 1 – для 90%-ного концентрату гліцерину; крива 2 – для суміші одномодульного калієвого рідкого скла з в'язкістю 85 сСт + 15% мас. гліцерину, в'язкість суміші 100 сСт; крива 3 – для одномодульного рідкого скла з в'язкістю 140сСт). Як видно з рис. 11, протизносні і протизадірні властивості суміші аналогічні до властивостей вихідного силікату з тією ж в'язкістю. Однак, при навантаженнях, більших за критичні, після деякого рівноважного стану (ділянка пологості кривої 2 в інтервалі навантажень 1750-3200 Н), настає катастрофічний знос, який властивий мінеральним оливам. Слід звернути увагу і на гостровершість піків кривих тертя-час на початку тертя під час і після критичного навантаження. При навантаженні 3200 Н коефіцієнт тертя підвищувався до 0,45-0,65, що говорить про настання металічного контакту.

На основі отриманих даних можна встановити зв'язок між поведінкою сталі під час граничного тертя в присутності рідкого скла та ймовірнісними процесами, які протікають на межі розділу фаз метал-рідке скло.

Розчини рідкого скла з модулем від 1 до 2 представляють собою системи з метасилікатними і дисилікатними йонами та дуже невеликим вмістом колоїдних частинок, розміри яких наближаються до йонних [36, 39]. З підвищенням концентрації силікату в розчині і модуля рідкого скла, з одного боку, силікатні йони утворюють асоціати, з іншого боку, дещо збільшується концентрація та розміри колоїдних частинок.

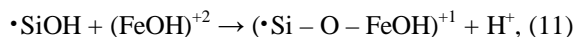
Загальну схему утворення колоїдних частинок та їх сітки (гелю) можна представити таким чином:



У ділянці докритичних навантажень граничний мастильний шар, ймовірно, можуть утворювати силікатні йони, колоїдні частинки або гель. Тертя сталі в присутності рідкого скла в цій ділянці навантажень характеризується низькими коефіцієнтами тертя (0,02-0,04). Тому нема потреби пояснювати таке зниження тертя та зносу тим, що граничний шар утворений «короткими» силікатними йонами.

Враховуючи, що агрегація колоїдних частинок в низькомодульному рідкому склі при цих умовах може досягати мінімуму (негативний заряд гальмує гелеутворення [39] і, крім того, свіжоутворений гель репертизується лугами), доцільно розглянути можливі граничні умови утворення колоїдних частинок на

поверхні сталі. Очевидно, процес полімеризації протікає так. Поява полімерного позитивно зарядженого ферум (III) гідроксиду на межі розділу фаз приводить до зміни заряду кремнезему:



що приводить до прогресуючої полімеризації кремнезему [39]. Але, разом з тим, утворений при цьому колоїдний кремнезем формує шар на колоїдному гідроксиді металу [41]. Тому, по мірі росту полімерних молекул кремнезему, здатність його сполучатися з йоном металу різко зменшується. Очевидно, в ділянці докритичних навантажень, коли умови тертя не сприяють реакції (7) і (8), граничний мастильний шар утворюють колоїдні частинки кремнезему, які містять невелику кількість ферум (III) гідроксиду.

Так як швидкість і ступінь полімеризації силікатних йонів прямо пропорційна квадрату концентрації кремнезему в розчині [42] і обернено пропорційна часу, який необхідний для того, щоб розчин силікату зміг досягнути певного стану полімеризації, то стає зрозумілою залежність критичного навантаження, яке витримує мастильна плівка, утворена із різних силікатів, від модуля і концентрації силікату в розчині.

Таким чином, граничний мастильний шар до критичних навантажень, сформований, в результаті адсорбції колоїдних частинок кремнезему, має певну будову і товщину, які визначаються силікатним модулем та концентрацією силікату в розчині. Чим більша товщина шару, тим він міцніше з'єднаний з поверхнею металу і, відповідно, в більшій мірі здатен витримувати навантаження та знижувати коефіцієнт тертя (порівняно з граничними шарами, утвореними мінеральними і синтетичними оливами).

У зв'язку з підвищенням температури в контакт і в результаті механічного руйнування адсорбованих шарів, рівновага адсорбція-десорбція колоїдних частинок на поверхні сталі зміщується вправо (10), що знижує інтенсивність регенерації адсорбованих шарів і приводить до заїдання (збільшується площа контакту і підвищується коефіцієнт тертя). Однак, при цьому (з підвищенням температури) різко збільшується швидкість хімічної реакції (7) і (8) і площа контакту, на якій протікає ця хімічна взаємодія. Граничний шар складається із підшару ферум (III) силікату, який покритий адсорбційно-колоїдним об'єднанням, що утворилося в результаті сумісної коагуляції позитивно зарядженої колоїдного ферум (III) гідроксиду та негативно зарядженого колоїдного кремнезему.

Кремнезем в такій суміш неперервно полімеризується, так що відношення йонів металу, зв'язаних з частинками кремнезему, буде залежати від того, наскільки глибоко відбувається полімеризація кремнезему. Так як швидкості хімічних реакцій під час тертя сильно залежать від температури (навантаження) і концентрації реагентів [43], то стає зрозумілим різний стрибок моменту тертя при критичних навантаженнях для силікатів різної в'язкості.

На ділянці після критичних навантажень

стрибковий нерегулярний характер тертя, очевидно, можна пояснити тим, що гель, який утворився в результаті частинної втрати адсорбційно-колоїдним конгломератом дисперсійного середовища, надає структурі граничного шару певну жорсткість, а також і характером дотику точок контакту поверхонь, покритих твердим ферум (III) силікатом.

Висновки

1. Встановлена можливість використання низькомодульного силікатного рідкого скла в якості мастильного матеріалу для важконавантажених підшипників кочення і зубчастих передач.

2. Показано, що рідке скло набагато перевищує мінеральні оливи за протизадирними властивостями.

3. Знос підшипників кочення при мащенні пластичним мастилом на основі рідкого скла приблизно однаковий із зносом під час роботи на солідолі і дещо менший, ніж знос під час роботи із мастилом на основі рідкого скла, загущеним низькоплавкими милами стеаринової кислоти.

4. Для успішної реалізації мастильних властивостей рідкого скла в реальних вузлах тертя необхідно загущувати його милами, які стійкі до гідролізу і мають порівняно низьку температуру топлення.

5. Тертя поверхонь сталі, змащених рідким склом, на ділянці післякритичних навантажень характеризується низькими коефіцієнтами тертя, а заїдання носить вироджений характер.

6. Гліцерин, що вводили в рідке скло, не змінює тертя сталі до критичних навантажень. Після критичних навантажень (вище 3200 Н) настає металічний контакт. В останньому випадку час, необхідний для десорбції молекул поліатомних спиртів з поверхонь сталі, перевищує час, необхідний для екранування ювенільних ділянок поверхні силікатними шарами. Крім того, гліцерин діє як сповільнювач гелеутворення в лужних силікатах [44].

7. Тертя та зношування сталі в присутності рідкого скла залежить від його силікатного модуля і концентрації силікату в розчині.

8. Мастильну здатність рідкого скла під час тертя сталі можна пояснити адсорбцією колоїдних частинок кремнезему на поверхні тертя (до критичного навантаження) і хімічним модифікуванням поверхні тертя (після критичного навантаження), в результаті якого утворюється твердий підшар ферум (III) силікату з відносно м'яким адсорбційно-колоїдним покриттям.

Сіренко Г.О. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теоретичної і прикладної хімії;

Кузишин О.В. – викладач кафедри теоретичної і прикладної хімії, магістр;

Добровольська М.М. – студентка V курсу, магістрантка кафедри теоретичної і прикладної хімії.

- [1] Е.Р. Брейтуэйт. Твердые смазочные материалы и антифрикционные покрытия. Химия, М. (1967).
- [2] Умэдзава Йосинобу. Высокотемпературные смазки на основе силиката натрия. Японск. пат., кл. 54В62, №375, Заяв. 5.06.59, опубл. 28.01.63. *РЖ Химия*, 2П332 (1964).
- [3] R. Hubert, H. Thannberger. *Progress in extruding steel with glass lubricants*. Metal Progress, №2 (1963).
- [4] А.А. Кутьков, Г.А. Сиренко, В.А. Щеголев. Жидкое стекло как смазочный материал для подшипников качения и зубчатых передач // *Сб. «Вопросы теории трения, износа и смазки»*. Т.215. РИО Новочерк. политех. ин-та, Новочеркасск, с. 42-49 (1969).
- [5] А.А. Кутьков, Г.А. Сиренко, Н.В. Карнопольцев. Механизм смазочного действия жидкого стекла при трении стали // *Сб. «Вопросы теории трения, износа и смазки»*. Т.215. РИО Новочерк. политех. ин-та, Новочеркасск, С. 110-121.
- [6] В.Г. Серов, Л.П. Робота, В.И. Бортницкий, Т.В. Дмитриева, Ю.В. Савельев. Термодеструкция гибридных органо-неорганических функциональных уретанмочевин // *Полимерный журнал*, XXXI (4), сс. 315-320 (2009).
- [7] *Hybrid materials. Synthesis, characterization and applications* / ed. G Kickelbick. Verlag GmbH & Co, Weinheim Wiley-VCH. 485 p. (2007).
- [8] H. Sugimoto, E. Nakanishi, K. Yamauchi, K. Daimatsu, T. Yasumura, K. Inomata // *Polymer Bulltin*, 52, P. 209-218 (2004).
- [9] C. Sanchez, B. Lebeau, F. Ribot, In. M. // *J. of Sol-Gel Sci. and Technology*. 19, P. 31-38 (2000).
- [10] L.M. Bronstein, R.L. Karlinsey, K. Ritter, C.G. Joo, B. Stein, J.W. Zwanziger // *J. Mater. Chem.* 14, P.1812-1820 (2004).
- [11] L.M. Bronstein, E. Ashcraft, P. DeSanto, Jr., R.L. Karlinsey, J.W. Zwanziger // *J. Phys. Chem.* 108, P. 5851-5858 (2004).
- [12] С.С. Ищенко, А.Б. Придатко, Т.И. Новикова, Е.В. Лебедев // *Высокомолекуляр. соединения. Сер. А*. 38, №5, С. 786-791 (1996).
- [13] Ye.P. Mamunya, V.I. Shtompel, E.V. Lebedev, P. Pissis, A. Kanapitsas, G. Boiteux // *Eur. Polym. J.* 40, P. 2323-2331 (2004).
- [14] I.M. Arafá, M.M. Fares, A.S. Barham // *Eur. Polym. J.* 40, P. 1477-1487 (2004).
- [15] О.А. Шилова, В.В. Шилов // *Нанокompозити, наноматеріали, нанотехнології*. 1(1). С. 9-83 (2003).
- [16] С.С. Ищенко, А.Б. Придатко, Т.И. Новикова, Е.В. Лебедев // *Высокомолекул. соединения. Сер. А*. 37(7), С. 1125-1129 (1995).
- [17] Е.В. Лебедев, С.С. Ищенко, А.Б. Придатко // *Композиц. полимер. материалы*. 21(1), С.3-12 (1999).
- [18] С.П. Мамуня, Мишак В.Д., С.В. Лебедев // *Полимер. журн.* 26(1), С. 40-45 (2004).
- [19] Ye. Mamunya, A. Kanapitsas, P. Pissis, G. Boiteux, E. Lebedev // *Macromol. Symp.* 198. P. 449-459 (2003).
- [20] H. Zois, A. Kanapitsas, P. Pissis, L. Apekis, E. Lebedev, Ye. Mamunya // *Macromol. Symp.* 205, P. 263-272 (2004).
- [21] С.П. Мамуня, М.В. Юрженко, С.В. Лебедев, С.С. Ищенко // *Полимер. журн.* 29(2), С. 100-105 (2007).
- [22] В.А. Листов. Выступление. В сб.: Труды II Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах, Т. IV. Машиностроение, М. 1952.
- [23] Р.М. Матвеевский. Температурный метод оценки предельной смазочной способности масел. Изд-во АН СССР, Москва (1956).
- [24] F.T. Barwell, D. Scott. Effect of Lubricant on Pitting Failure of Ball Bearings: Experimental Results for Various fluids // *Engineering*. 182 (4713), (1956).
- [25] J.R. Hughes. The Shell four-ball. F.P. Lubricant tester. Methods of use and precision in the determination of the F.P. properties of lubricants // *Conference on lubrication and wear*, Inst. Mech. Eng., London (1957).
- [26] Р.М. Матвеевский. Четырехшариковая машина КТ-2 для определения критических температур пленки масла на металле // *Сб. «Передовой научно-технический и производственный опыт»*, Изд-во ВИНТИ, Москва, (32), (1957).
- [27] М.Д. Безбородько, Н.Т. Павловская, Г.В. Виноградов. Машина трения для испытания смазочной способности нефтепродуктов // *Заводская лаборатория*, (10), (1958).
- [28] И.Г. Цуркан, Г.В. Виноградов. Новая четырехшариковая машина для оценки противоизносных свойств смазочных масел // *Заводская лаборатория*, (9), (1959).
- [29] Г.В. Виноградов, Н.Т. Павловская, М.Д. Безбородько, А.А. Константинов, В.И. Драндин. Четырехшариковые машины трения для исследования противоизносных и антифрикционных свойств смазочных материалов при высоких температурах // *Сб. «Приборы для исследования физико-механических свойств и структуры металлов и материалов»*, 6(30), ЦИТЭИН, Москва, (1960).
- [30] Р.М. Матвеевский. Исследование трения пластмасс по стали без смазки и в присутствии смазки // *Вестник машиностроения*, (6), (1960).
- [31] ГОСТ 9490-60. Методика оценки противозадирных свойств масел на четырехшариковой машине.
- [32] М.Д. Безбородько, Г.В. Виноградов, Ю.Я. Подольский, Л.И. Шабаров. Четырехшариковые машины трения и их модифицирование для изучения антифрикционных свойств и износостойкости пластмасс // *Сб. «Методы испытания на изнашивание»*. Изд-во АН СССР, Москва, сс. 81-88 (1962).

- [33] 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).
- [34] Г.А. Сиренко, 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**, С. 38-42 (1969).
- [35] Р.В. Гриневич, В.В. Цасюк, А.С. Смирнов. Специализированные машины трения // Применение полимерных материалов. Картя Молдовеняскэ, Кишинев, сс. 33-36 (1975).
- [36] П.Н. Григорьев, М.А. Матвеев. *Растворимое стекло*. Промстройиздат, М. (1956).
- [37] А.П. Крешков. *Теория образования новых видов силикатных материалов на основе кремнеорганических соединений*. ДАН СССР, **59**, 723 с. (1948).
- [38] Я.К. Сыркин, М.Е. Дяткина. *Химическая связь и строение молекул*. Госхимиздат, М. (1946).
- [39] Ральф К. Айлер. *Коллоидная химия кремнезема и силикатов*. Госстройиздат, М. (1959).
- [40] Г.В. Виноградов, Н.С. Наметкин, М.И. Носов. Противоизносные и антифрикционные свойства полиорганосилоксанов и их смесей с углеводородами // Сб. «Новое о смазочных материалах». Химия, М. (1967).
- [41] J.G. Vail. *Soluble Silicates*. New York, **1** (1952).
- [42] Пер R.K. Y. *Phys. Chem.*, **57**, 604, (1953).
- [43] Т. Сакураи, С. Икеда, Х. Окабе. Исследование кинетики взаимодействия меченых серосодержащих соединений со сталью в процессе граничного трения // Сб. «Новое о смазочных материалах». Химия, М. (1967).
- [44] L.A. Munro, Y.A. Pearce, Y. *Can. Research*. **17B** (1939).

H.A. Sirenko, O.V. Kuzyshyn, M.M. Dobrovolska

Antifriction Properties of Lubricating Layers Formed from Potassium Silicate Solutions in Friction and Wear of steel in Point Contact

Vasyl Stefanyk' Precarpathian National University, 57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76000, Ukraine

Antifriction and viscous-temperature properties of low-module potassium silicate solutions, naphthenic and mineral oils, synthetic fluids in point contact of four-balls friction machine and on the stand of ball bearing and rolling have been studied. It has been determined that low-module potassium silicate solution imparts steel with high anti-wear and antiscaff properties. The mechanism of lubricating effect of potassium silicate solution has been found.