ФІЗИКА І ХІМІЯ ТВЕРДОГО ТІЛА
Т. 7, № 3 (2006) С. 593-600

PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLID STATE
V. 7, № 3 (2006) P. 593-600

УДК 621.892.8:061.3

ISSN 1729-4428

Г.О. Сіренко, О.В. Кузишин

Зношування твердих тіл при наявності на їх поверхнях наноплівок мастильних матеріалів: залежність товщини плівок мінеральних олив від навантаження і температури

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76000, Україна

Приведені розрахунки товщин мастильних плівок чотирьох мінеральних олив – вазелінової (медичної), індустріальної-20, компресорної-12М, авіаційної МС-20 – та залежності їх від температури і навантаження

Ключові слова: граничне тертя, гідродинамічний ефект, наноплівка, в'язкість, мастильний шар, кульовий контакт, температура.

Стаття поступила до редакції 15.03.2006р.; прийнята до друку 15.06.2006р .

Вступ

У роботі [1] в формули для визначення критеріїв гідродинамічних ефектів при терті твердих тіл і наявності на їх поверхнях плівок мастильних матеріалів введено коефіцієнт стисливості рідин і врахована багатопараметрична залежність в'язкості, п'єзокоефіцієнту в'язкості та коефіцієнту стисливості від тиску, температури, вихідної в'язкості при нормальних умовах та швидкості руху суміжних поверхонь.

Знайдено [1] вираз для розрахунку товщини мастильних плівок через критерій гідродинамічних ефектів і за допомогою формул контактно-гідродинамічної теорії доведено, що обидва методи розрахунку збігаються в межах 2,35-9,66%. На прикладі контакту термостійкого полімеру ароматичного поліаміду зі сталлю при 1-10% обмеженому мащенню мінеральною оливою показано, що мастильні плівки на суміжних поверхнях мають нанорозміри.

Доведено [1], що в контакті сфера-площина при змінному високому навантаженні і обмеженому мащенні мастильна наноплівка знаходиться у перехідному режимі від граничного тертя до пружно-гідродинамічного. При певних умовах (низька температура, високий тиск тощо) мастильні наноплівки знаходяться у квазітвердому стані.

Мета даної роботи полягала в тому, щоб за результатами випробувань мінеральних олив за схемою чотирикульового металічного контакту, використовуючи [1], знайти залежність товщини мастильної плівки від температури і навантаження.

I. Експериментальна частина

Висока чутливість точкового контакту до процесів, що виникають і супроводжують тертя та зношування твердих тіл [2], спонукали вибрати для дослідження схему контакту «куля-куля» (рис.1), який реалізується в чотирикульовій машині тертя (ЧКМТ) [2, 4].

Чотири кульки для вальниць діаметром 12,7 мм зі сталі ШХ-15 (HRC 60-65), були складені у піраміду (рис.1). Три долішні кульки були поміщені у підп'ятник і закріплені притискним кільцем. Горішня кулька жорстко була зафіксована у спеціальному патроні на кінцівці прямовисного валу [2, 4].

Геометрія тетраедра (рис.1) визначає значення лінійної швидкості у зоні контакту υ і величину нормальної складової N_i в теоретичній точці контакту осьової сили N на 3 кульки [3]:

$$\upsilon = \frac{d \cdot \omega}{2} \cdot \sin\alpha \left[м / с \right], \quad (1)$$

$$N_i = \frac{N}{3\cos\alpha} \approx 0,4086N\,[H], \quad (2)$$

де $d=12,7\cdot10^{-3}$[м] – діаметр кульок; $\omega=2\pi n$ – кутова швидкість обертання горішньої кульки, c^{-1} (n – число обертів цієї кульки за секунду; частота обертання f); $\alpha=35^{o}20'$ – кут між висотою і ребром правильного тетраедра (кут в основі піраміди з чотирьох кульок) (рис.1).

Випробування на навантажувальну здатність плівок мастильних олив проводили при 1140 обертів за хвилину горішньої кульки ($f=19c^{-1}$), що

відповідало лінійній швидкості у зоні контакту υ=0,4384 м/с.

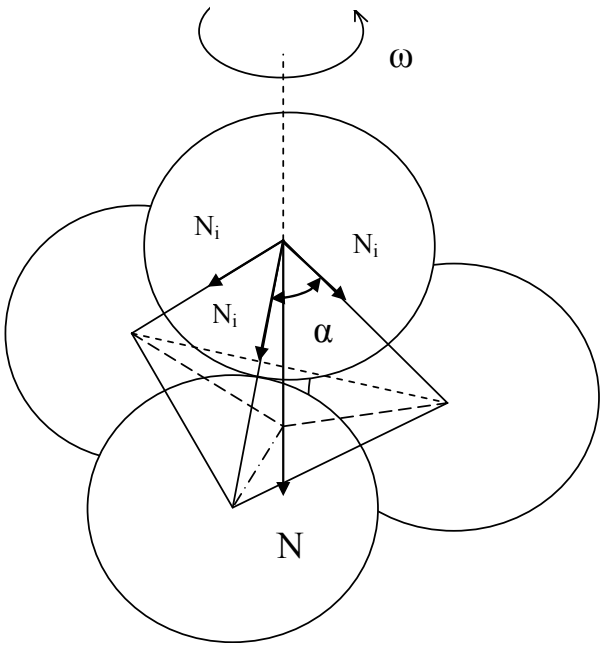

Рис. 1. Схема чотирикульового контакту.

При визначенні навантаження заїдання – критичного навантаження $N_{iкр.}$, при якому спостерігається підвищений знос сталі, – навантаження N змінювали ступенями від 100-200 Н до $N_{кр.}$, а в ділянці $N_{кр.}$- через 10-25 Н. Кожний дослід тривав 1 хв. і проводився окремо з новою порцією мастила. ЧКМТ була обладнана тензометричним пристроєм і потенціометром КСП-4, що дозволяло перехід до $N_{кр.}$ фіксувати за різким зростанням моменту тертя (коефіцієнта тертя). Температура мастильної оливи визначали за ~2,5 мм від зони контакту, яка в момент задиру становила 90±5ºС.

Початковий p_0 та у кінці випробування $p_к$ тиски у зоні контакту, що витримувала мастильна плівка, розраховували за [5]:

$$p_o = N_i \Big/ \frac{\pi d_г^2}{4}; \qquad (3)$$

$$p_к = N_i \Big/ \frac{\pi d_з^2}{4}, \qquad (4)$$

де $d_з$ – діаметр плями зношування для однієї кульки; $d_г$ – діаметр плями пружної деформації за Герцем, розрахований за формулою[5], для однієї кульки:

$$d_г = 1{,}76\sqrt[3]{\frac{N_i \cdot d/2}{E}} = 0{,}040948\sqrt[3]{N}\,[мм],$$

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

Знос сталі визначали за $d_з$ [мм], $\Delta d=(d_з - d_г)$ [мм] та безрозмірним показником зносу J_4 за 60 с випробувань на навантажувальну здатність:

$$J_4 = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{d_{зi} - d_{гi}}{d_{гi}}\right)^2}, \qquad (5)$$

де $d_{зi}$, $d_{гi}$ брали від N=200 Н до $N_{кр.}$ через N_i=100Н плюс $d_{зкр.}$ і $d_{Гкр.}$ при $N_{кр.}$; $d_{кр.}$– діаметри плями зносу або пружної деформації при $N_{кр.}$.

Оцінку протизношувальних властивостей мастильних плівок здійснювали також за діаметром плями зносу при N=200 Н (N_i=82 Н) за 60 с випробувань на навантажувальну здатність та діаметром плями зносу при N=200 Н (N_i=82 Н) за 4 год. випробувань при 1470 обертів горішньої кульки за хвилину (f=24,5c^{-1}), що відповідало лінійній швидкості у зоні контакту υ=0,5653 м/с, при цьому температура за ~3 мм від зони контакту, що визначена термопарою ХК і вторинним приладом – потенціометром КСП-4, становила 45±5ºС в межах 0,5-4 год. випробувань різних мастильних олив. Для оцінки гідродинамічних ефектів використали критерій Ланкастера [1,6,7]:

$$S_{h0} = \frac{\eta_{0t}\,\upsilon\,(d_г)^3}{N_i} = \frac{\nu_{0t}\rho_t\,\upsilon\,(d_г)^3}{N_i}\left[м^2\right], \qquad (6)$$

$$S_{hт} = \frac{\eta_т\,\upsilon\,(d_з)^3}{N_i} = \frac{\nu_t\rho_t\,\upsilon\,(d_з)^3}{N_i}\left[м^2\right], \qquad (7)$$

де η_{0t}, ν_{0t} – динамічна і кінематична в'язкість мастильної рідини при нормальному тиску і температурі t в герцівському контакті (при прикладанні навантаження і часі τ_0=0);

η_t, ν_t – теж саме в кінці зношування;

ρ_t – густина мастильної рідини при нормальному тиску і температурі t.

Використовуючи співвідношення [8], запишемо:

$$d_{кр.} = k\left(N_i \big/ \eta_{0t}\,\upsilon\right)^{1/3}, \qquad (8)$$

звідки знайдемо

$$d_{кр.} = 2{,}73\,h_{кр.}^{2/3}\left(N_i \big/ \eta_{0t}\,\upsilon\right)^{1/3}, \qquad (9)$$

звідки

$$h_0 = \left(\frac{S_{h0}}{20{,}3465}\right)^{1/2}, \qquad (10)$$

$$h_т = \left(\frac{S_{hт}}{20{,}3465}\right)^{1/2}, \qquad (11)$$

де h_0, $h_т$ – товщина мастильної плівки на початку тертя (герцівський контакт) і в кінці тертя відповідно.

Для дослідження наноплівок, що утворюються на поверхні сталі ШХ-15, використали такі оливи: авіаційну МС-20; компресорну 12(М); індустріальну-20; вазелінову (медичну) (табл.1).

II. Результати та обговорення

На рис. 2 приведені результати дослідження на ЧКМТ навантажувальної здатності мастильних плівок на поверхні сталі ШХ-15. Результати представлені у вигляді таких залежностей:

$$d_г = f(N_i, N_{кр.}, p_0) \quad (12)$$

$$d_\tau = \psi(N_i, N_{кр.}, p_0) \quad (13)$$

для вазелінової (медичної) (крива 1), індустріальної-20 (крива 2), компресорної 12(М) (крива 3) та авіаційної МС-20 (крива 4) олив. Лінія а відповідає діаметрам $d_г$ плям пружної деформації за Герцем.

Як видно з рис. 2, перехід мастильної плівки до критичного стану супроводжується різким зростанням діаметра плями зносу $d_з$ до 1,5-2,2 мм (і підвищенням коефіцієнта тертя, величини якого засвідчують про настання металічного контакту). У табл. 1 зведені дані розрахунків за рис.2 показників протизадирних властивостей $N_{iкр.}$, $\Delta d_{кр.}$ і $d_{кр.}$ за 60 с, протизношувальних властивостей J_4, $d_з$ за 60 с і 4 год. та кінематичної в'язкості при 45 і 90ºС мастильних олив.

Пошук лінійної кореляції між $N_{iкр.}$ та $\nu_{45°}$, $\nu_{90\,°C}$, $\Delta d_{кр.}$, $d_{кр.}$, J_4 та між $d_з$ (за 60 с), $d_з$ (за 4 год.), J_4 та $\nu_{45°}$ проводили за вибірковим коефіцієнтом кореляції $r_{x,\,y}$ [9]. Прийняття або відкидання нульової гіпотези (рівності нулю генерального коефіцієнта кореляції H_0: $\rho_{x,y}=0$) здійснювали за критичним значенням коефіцієнта кореляції $r_{кр.}$ {α=0,05; f=N-2=2} [10], де α – рівень значущості, f – число ступенів вільностей. З-за обмеженості обсягу вибірки $r_{x,y}$ і суттєвої відмінності його розподілу від нормального закону Гаусса перейшли до нової випадкової величини z за перетворенням Фішера [9]:

$$z = \frac{1}{2}\ln\frac{1+r_{x,y}}{1-r_{x,y}}, \quad (14)$$

розподіл якої добре апроксимується нормальним законом Гаусса зі середнім квадратичним відхиленням:

$$\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{N-3}} = 1. \quad (15)$$

При $|r_{x,y}| \le r_{кр.}$ плюс $|z| \le (z_p \cdot \sigma_z)$, де $z_p = z_{1-\alpha/2} = z_{0,975} = 1{,}96$ [9] – значення квантиля нормованого нормального розподілу випадкової

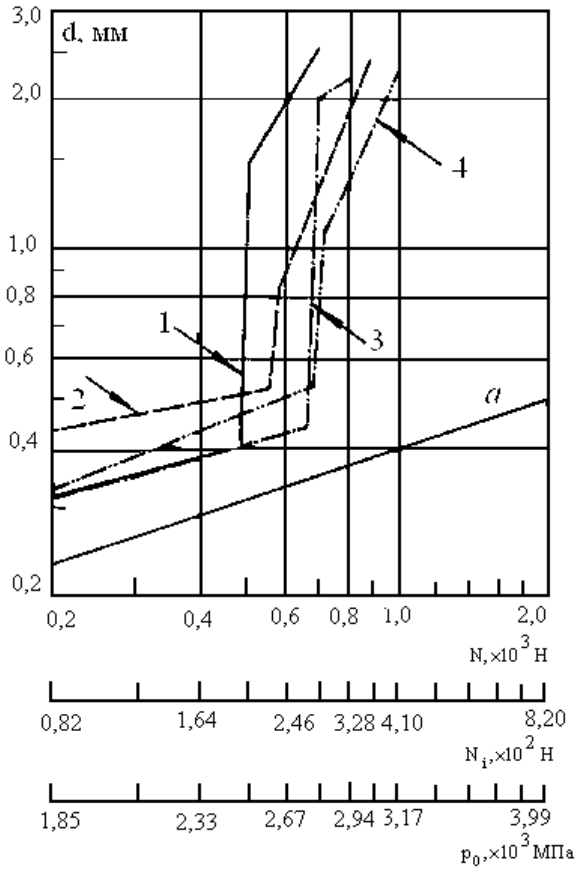

Рис. 2. Залежність діаметра плями зносу d_τ від осьового навантаження N, навантаження на одну кульку N_i і середнього початкового тиску p_0 для мастильних олив: 1–вазелінова (медична);2–індустріальна-20; 3 – компресорна-12М; 4 – авіаційна МС-20; а–лінія пружної деформації за Герцем для $d_г$.

величини z для α=0,05, нульову гіпотезу H_0 приймали (з ймовірністю p=0,95 та з ймовірністю ризику α=0,05), а при $|r_{x,y}|>r_{кр.}$ плюс $|z|>(z_p \cdot \sigma_z)$ H_0 відкидали (з ймовірністю p=0,95 та з ймовірністю ризику α=0,05). Результати розрахунків $r_{x,y}$ для y і x та значення $r_{кр}$ і $r_{x,y}$ $(z_{0,975} \cdot \sigma_z)$ зведені в табл. 2. Як видно з табл. 2, з α=0,05 лінійної кореляції між будь-якими дослідженими величинами не виявлено.

Для найбільших коефіцієнтів кореляції між $N_{iкр.}$ і $\nu_{45°}$, $N_{iкр.}$ і $\nu_{90°}$, $N_{iкр.}$ і $d_{кр.}$ лише з великою ймовірністю ризику α=0,40 можна стверджувати про слабкий лінійний зв'язок між $N_{iкр.}$ і $\nu_{90°}$ $[(z_{0,8} \cdot \sigma_z)=0{,}84]$.

Таблиця 1

В'язкісно-температурні, протизадирні та протизношувальні властивості мастильних олив при терті пари «сталь ШХ-15 – сталь ШХ-15»

Мастильна олива	Кінематична в'язкість, мм²/с		Протизадирні властивості			Протизношувальні властивості		
	45ºС	90 ºС	$N_{iкр.}$, Н	$\Delta d_{кр.}$, (мм) за 60с	$d_{кр.}$, (мм) за 60с	$d_з$, (мм) за 60с N=200 Н	$d_з$, (мм) за 4 год. N=200 Н	J_4 за 60 с
авіаційна МС-20	414	28,2	281	0,174	0,529	0,324	0,57	0,441
компресорна-12(М)	110	19,4	278	0,087	0,439	0,314	0,92	0,277
індустріальна-20	32,6	9,2	242	0,193	0,525	0,432	1,07	0,683
вазелінова (медична)	44,6	10	201	0,081	0,399	0,314	0,65	0,289

Таблиця 2

Коефіцієнти лінійної кореляції (α=0,05; f=2) між критичним навантаженням і в'язкістю та показниками зносу

Кореляційний зв'язок між величинами y і x	$r_{x,y}$	$r_{кр.}$ [10]	z	$(z_{0,975} \cdot \sigma_z)$ [9]
$N_{ікр.} \sim \nu_{45°}$	0,654	0,95	0,783	1,96
$N_{ікр.} \sim \nu_{90°}$	0,815	0,95	1,142	1,96
$N_{ікр.} \sim \Delta d_{кр.}$	0,314	0,95	0,325	1,96
$N_{ікр.} \sim d_{кр.}$	0,551	0,95	0,623	1,96
$N_{ікр.} \sim J_4$	0,045	0,95	0,045	1,96
$d_з$ (60 с) $\sim \nu_{45°}$	-0,364	0,95	-0,382	1,96
$d_з$ (4 год.) $\sim \nu_{45°}$	-0,651	0,95	-0,777	1,96
$J_4 \sim \nu_{45°}$	-0,057	0,95	-0,057	1,96
$d_з$ (4 год.) ~ $d_з$ (60 с)	0,728	0,95	0,925	1,96
$J_4 \sim d_з$ (60 с)	0,948	0,95	1,812	1,96
$J_4 \sim d_з$ (4 год.)	0,520	0,95	0,576	1,96

Таким чином, в'язкісно-температурні характеристики олив та напруження контакту (за $\Delta d_{кр.}$ і $d_{кр.}$) не визначають критичний стан мастильної плівки та їх протизношувальні властивості.

На рис. 3 приведена залежність товщини мастильної плівки на початку (h_0) і в кінці (h_τ) 1 хв. випробувань (рис.1) від температури для авіаційної МС-20, компресорної-12(М), індустріальної-20 і вазелінової (медичної) олив.

Експериментальні дані залежностей товщини мастильної плівки в герцівському контакті $h_0(y_1)$ та в кінці 1 хв. випробувань на ЧКМТ h_τ (y_2) від температури t(x) в межах від N_0=200 Н до $N_{ікр}$ апроксимуються рівняннями для олив:

авіаційна МС-20

$$h_0 \quad y_1 = 2725x^{-1,2483},\ R^2 = 0,997,\ R_1^2 = 0,996; \qquad (16)$$

$$h_\tau \quad y_2 = 4951,9x^{-1,2482},\ 2R^2 = 0,997,\ R_1^2 = 0,996; \qquad (17)$$

компресорна-12 (М)

$$h_0\ y_1 = 1037,2x^{-1,0772},\ R^2 = 0,9866,\ R_1^2 = 0,9821; \qquad (18)$$

$$h_\tau\ y_2 = 1443,2x^{-1,0772},\ R^2 = 0,9866,\ R_1^2 = 0,9821; \qquad (19)$$

індустріальна-20

$$h_0\ y_1 = 182,97x^{-0,7784},\ R^2 = 0,984,\ R_1^2 = 0,9787; \qquad (20)$$

$$h_\tau\ y_2 = 363,86x^{-0,7783},\ R^2 = 0,984,\ R_1^2 = 0,9787; \qquad (21)$$

вазелінова (медична)

$$h_0\ y_1 = 26,62e^{-0,0178x},\ R^2 = 0,9984,\ R_1^2 = 0,9979; \qquad (22)$$

$$h_\tau\ y_2 = 37,354e^{-0,0178x},\ R^2 = 0,9984,\ R_1^2 = 0,9979, \qquad (23)$$

тут $R^2 = 1 - \frac{SS_{ад.}}{SS_{від.}}$ характеризує тісноту (силу) нелінійного зв'язку в рівняннях регресії, де $SS_{ад.} = \sum_{i=1}^{N}\left(y_i - \hat{y}_i\right)^2$ – девіата дисперсії адекватності (сума квадратів відхилення, що пов'язана з дисперсією адекватності):

$$S^2_{ад.} = \frac{SS_{ад.}}{f_{ад.}} = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(y_i - \hat{y}_i\right)^2}{N-\lambda}; \qquad (24)$$

де N – число дослідів, які враховували при оцінці коефіцієнтів регресії; λ – число коефіцієнтів рівняння регресії; $f_{ад.}$=(N–λ) – число ступенів свободи, що пов'язане з дисперсією адекватності; y_i – результат окремого спостереження; $\hat{y}_i$ – розрахункове значення y за рівнянням регресії (моделі);

$SS_{від.} = \sum_{i=1}^{N}\left(y_i\right)^2 - \frac{1}{N}\left(\sum_{i=1}^{N} y_i\right)^2$ – девіата дисперсії відтворення (сума квадратів відхилення, що пов'язана з дисперсією відтворення):

$S^2_{від.} = \frac{SS_{від.}}{f_{від.}}$ (характеризує помилку всього експерименту);

$f_{від.}$=(N–1) – число ступенів свободи, що пов'язане з дисперсією відтворювання.

Тут оцінку тісноти (сили) нелінійного зв'язку в рівнянні регресії дано також за квадратом кореляційного співвідношення:

$$R_1 = \sqrt{1 - \frac{S^2_{ад.}}{S^2_{від.}}} = \sqrt{1 - \frac{SS_{ад.}(N-1)}{SS_{від.}(N-\lambda)}}, \qquad (25)$$

при цьому R= R_1 при λ=1.

Як видно з наведених вище даних, для авіаційної, компресорної та індустріальної олив рівняння регресії залежностей h_0, $h_\tau \sim \psi(t)$ має вигляд $y = b_0 x^{-b_1}$, при цьому в ряду наведених мастил абсолютне значення b_0 і b_1 значно зменшується як для h_0, так і h_τ; для вазелінової оливи рівняння регресії має вигляд $y = b_0 \exp\left(-b_1 x\right)$, що ймовірно пов'язано з реологічними властивостями олив.

На рис. 3 приведені криві, які побудовані за усередненими даними для 4-6 навантажень від

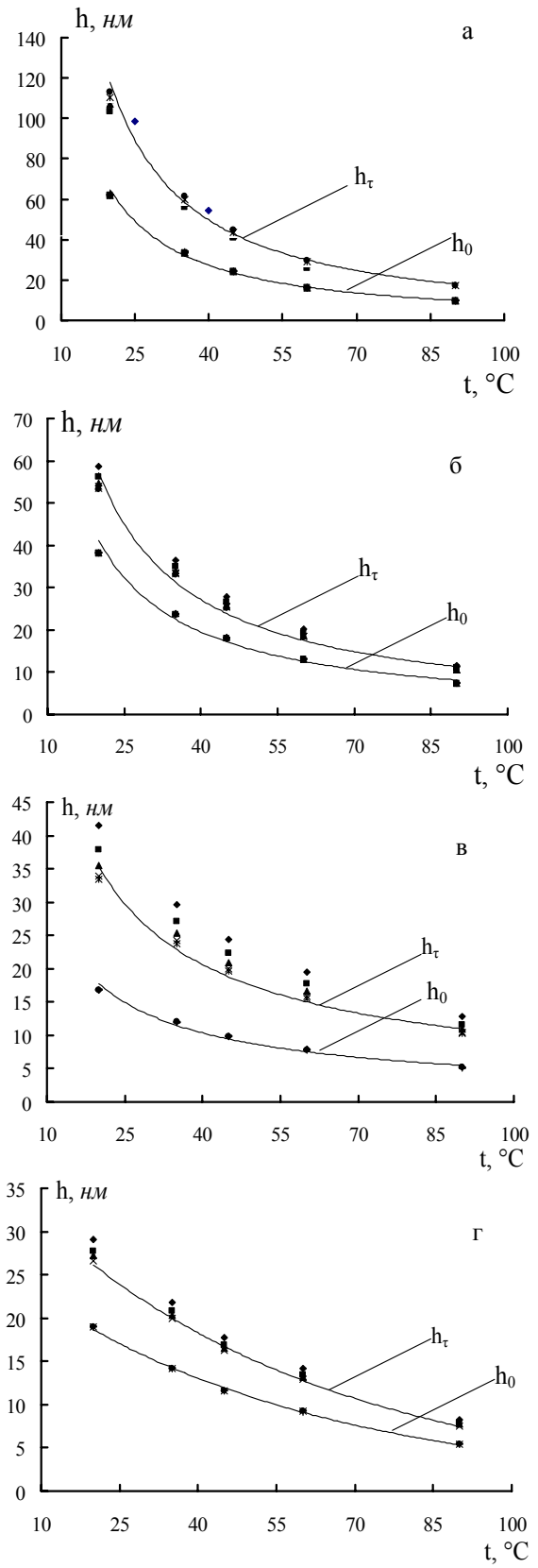

Рис. 3. Залежність товщини мастильної плівки на поверхні сталі ШХ-15 від температури для олив: а – авіаційна МС-20; б – компресорна-12 (М); в – індустріальна-20; г – вазелінова (медична).

N=200 Н до $N_{кр.}$ через ΔN=100 Н для кожної t-точки. Таке усереднення за навантаженнями залежностей h_0, h_τ~f(t) виправдано, так як залежності h_0, h_τ~ψ(N) мають лінійний характер і, окрім t=20ºС, для температур t=45-90ºС їх криві паралельні вісі абсцис, тобто h_0(t), h_τ(t)≈const (рис.4). Так, для авіаційної оливи (рис. 4*а*) при зміні N від 200 до $N_{кр.}$=688 Н: при 20ºС товщина мастильної плівки h_0 в герцівському контакті змінюється від 62,20 до 62,10 нм, при 45ºС – від 24,49 до 24,45 нм, при 60ºС – від 16,28 до 16,26 нм, при 90ºС – від 9,64 до 9,62 нм, тобто майже не змінюється, але товщина мастильної плівки h_τ в кінці 1 хв. випробувань змінюється при 20ºС від 100,24 до 112,89 нм, при 45ºС – від 39,47 до 44,45 нм, при 60ºС – від 26,24 до 29,55 нм, при 90ºС – від 15,53 до 17,50 нм, тобто повільно зростає, що пов'язано з реологічними властивостями цього мастила та додатковим збільшенням площадки пружної деформації за рахунок зношування, що є сприятливим явищем для високов'язкої рідини.

При цьому, величина критерію гідродинамічного ефекту майже не змінюється: при 20ºС Sh_0=(7,87-7,85)·10^{-14} м^2, Sh_τ=(2,05-2,59)·10^{-13} м^2, при 90ºС Sh_0=(1,89-1,88)·10^{-15}м^2, Sh_τ=(4,91-6,23)·10^{-15} м^2.

Аналогічно для компресорної оливи (рис. 4б) при зміні N від 200 до $N_{кр.}$=680 Н: при 20ºС h_0 змінюється від 38,24 до 38,28 нм, h_τ – від 58,77 до 53,27 нм, при 90ºС h_0 – від 7,48 до 7,49 нм, h_τ –від 11,50 до 10,43 нм, при цьому величина критерію гідродинамічного ефекту змінюється в межах Sh_0=(2,97-2,98)·10^{-14} м^2 і Sh_τ=(7,03-5,77)·10^{-14} м^2 при 20ºС та Sh_0=(1,14-1,14)× ×10^{-15} м^2, Sh_τ=(2,69-2,21)·10^{-15} м^2 при 90ºС.

Для індустріальної оливи (рис. 4в) при зміні N від 200 до $N_{кр.}$=592 Н: при 20ºС h_0 змінюється від 16,79 до 16,80 нм, h_τ від 41,57 до 33,41 нм, при 90ºС h_0 від 5,15 до 5,16 нм, h_τ – від 12,76 до 10,26 нм, при цьому величина критерію гідродинамічного ефекту Sh змінюється в межах Sh_0=(5,73-5,74)·10^{-15} м^2 і Sh_τ=(3,52-2,27)·10^{-14} м^2 при 20ºС та Sh_0=(5,40-5,41)× ×10^{-16} м^2 і Sh_τ=(3,32-2,14)·10^{-15} м^2 при 90ºС.

Для вазелінової оливи (рис. 4г) при зміні N від 200 до $N_{кр.}$=492 Н: при 20ºС h_0 змінюється від 18,96 до 18,98 нм, h_τ – від 29,11 до 26,64 нм, при 90ºС h_0 від – 5,37 до 5,38 нм, h_τ від 8,25 до 7,55 нм, при цьому величина критерію гідродинамічного ефекту змінюється в межах Sh_0=(7,31-7,33)·10^{-15} м^2, Sh_τ=(1,72-1,44)·10^{-14}м^2 при 20ºС та Sh_0=(5,87- -5,89)·10^{-16} м^2, Sh_τ=(1,39-1,16)·10^{-15} м^2 при 90ºС.

Як видно з цих результатів, мастильна наноплівка на поверхні сталі ШХ-15 в інтервалі t=20-90ºС та N=200-$N_{кр.}$ Н знаходиться в стані жорсткого граничного тертя, при цьому цей стан найбільше жорсткий при 90ºС, ніж при більш низьких температурах.

Повернемося до рис. 3, на якому приведені криві залежності товщини наноплівки мастильних олив від температури, і будемо оперувати усередненими даними за навантаженнями.

Як видно з рис. 3, товщина плівки h_0, h_τ різко зменшується зі зростанням температури: а) для авіаційної оливи (рис.3а) при герцівському контакті h_0 – від 62,13 до 9,63 нм при зміні температури від 20 до 90ºС, при цьому величина критерію гідродинамічного ефекту Sh_0 зменшується від

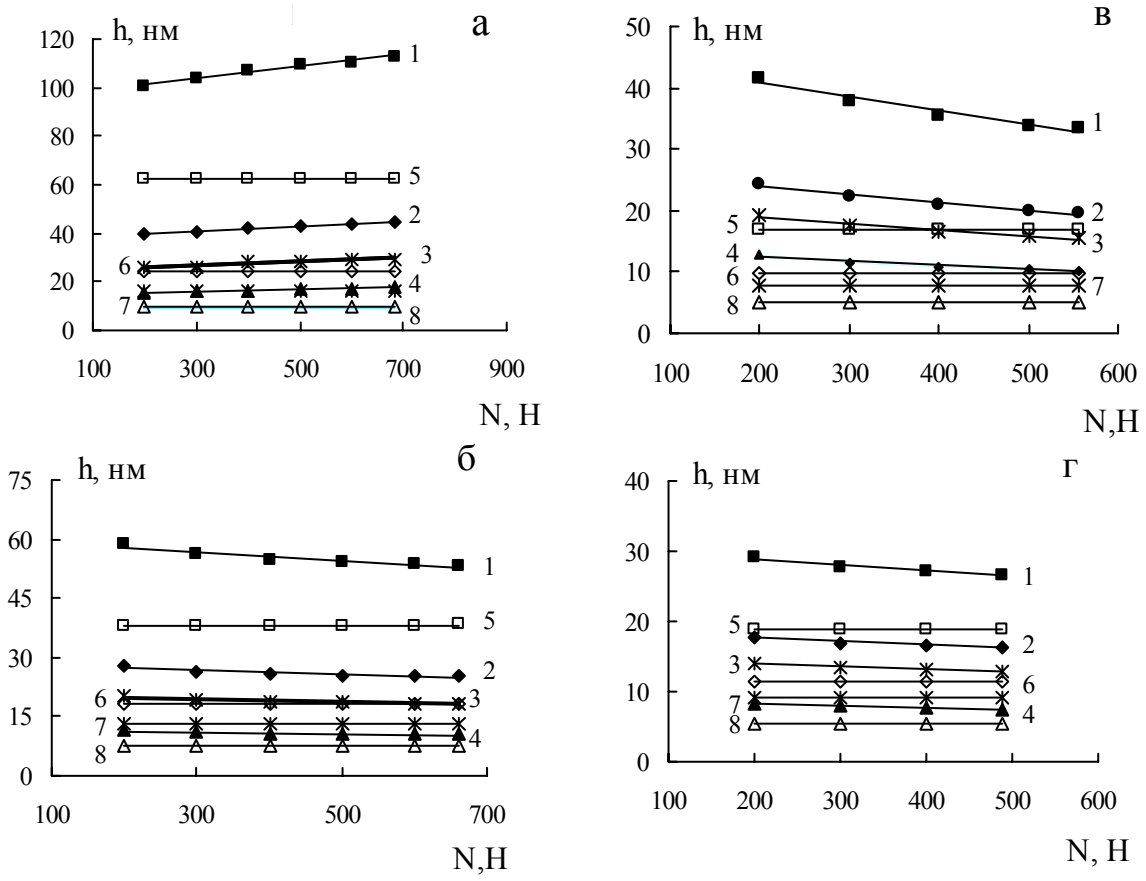

Рис. 4. Залежність товщини мастильної плівки в кінці випробувань h_τ (1–4) та в герцівському контакті на початку випробувань h_0 (5-8) від навантаження N (ºС):1,5-20; 2,6-45; 3,7-60; 4,8-90; для олив: а – авіаційна МС-20; б – компресорна-12(М); в – індустріальна-20; г – вазелінова (медична).

$7{,}85\cdot10^{-14}$ м^2 до $1{,}89\cdot10^{-15}$ м^2, а в кінці 1 хв. випробувань h_τ – від 107,32 до 16,63 нм при зміні температури від 20 до 90ºС, при цьому Sh_τ зменшується від $2{,}35\cdot10^{-13}$ до $5{,}64\cdot10^{-15}$ м^2; б) для компресорної оливи (рис. 3б) на початку випробувань товщина наноплівки h_0 зменшується від 38,21 до 7,48 нм при зміні температури від 20 до 90ºС, при цьому Sh_0 змінюється від $2{,}97\cdot10^{-14}$м^2 до $1{,}14\cdot10^{-15}$ м^2, а в кінці випробувань товщина плівки h_τ зменшується від 55,07 до 10,78 нм при зміні температури від 20 до 90ºС, при цьому Sh_τ змінюється від $6{,}18\cdot10^{-14}$м^2 до $2{,}24\cdot10^{-15}$ м^2; в) для індустріальної оливи (рис. 3в) на початку випробувань товщина наноплівки h_0 зменшується від 16,78 до 5,15 нм при зміні температури від 20 до 90ºС, при цьому Sh_0 змінюється від $5{,}72\cdot10^{-15}$ м^2 до $5{,}40\cdot10^{-16}$ м^2, а в кінці випробувань товщина наноплівки h_τ зменшується від 36,47 до 11,20 нм при зміні температури від 20 до 90ºС, при цьому Sh_τ змінюється від $2{,}72\cdot10^{-14}$ м^2 до $2{,}57\cdot10^{-15}$ м^2; г) для вазелінової оливи (рис. 3г) на початку випробувань товщина наноплівки h_0 зменшується від 18,95 до 5,37 нм при зміні температури від 20 до 90ºС, при цьому Sh_0 змінюється від $7{,}31\cdot10^{-15}$ м^2 до $5{,}87\cdot10^{-16}$ м^2, а в кінці випробувань товщина наноплівки h_τ зменшується від від 27,68 до 7,85 нм при зміні температури від 20 до 90ºС, при цьому Sh_τ змінюється від $1{,}56\cdot10^{-14}$ м^2 до $1{,}26\cdot10^{-15}$ м^2.

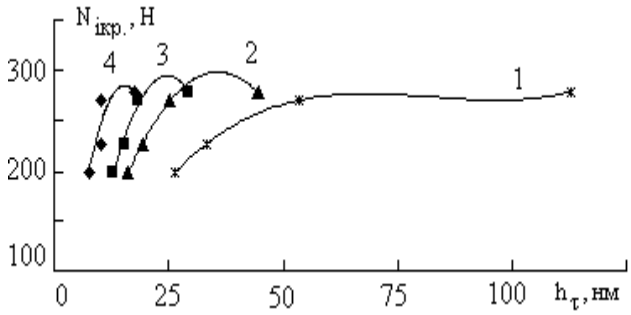

Рис. 5. Залежність критичного навантаження в точці контакту, що витримує мастильна плівка, від її товщини в кінці 1 хв. випробувань h_τ і температури (ºС): 1 – 20; 2–45; 3 – 60; 4–90 (точки на одній кривій відповідають різним мастильним рідинам

Таким чином, можна стверджувати, що з підвищенням температури і навантаження відбувається стоншення мастильної плівки до h_0=5,15-9,63 нм та h_τ=7,85-16,63 нм при зменшенні величини критерію гідродинамічного ефекту до $Sh_0=(0{,}54\text{-}1{,}89)\cdot10^{-15}$ м^2 та $Sh_\tau=(1{,}26\text{-}5{,}64)\cdot10^{-15}$ м^2, що приводить до критичного стану наноплівки мастильних олив, який завершується настанням прориву плівки і металічним контактом на окремих ділянках мікровиступів шорсткої поверхні.

Таблиця 3

Лінійна кореляція (α=0,05; f=2) між критичним навантаженням та товщинами наноплівки h_0, h_τ і величинами критеріїв гідродинамічних ефектів Sh_0, Sh_τ

Кореляційний зв'язок між величинами y і x	$r_{x,y}$	$r_{кр.}$ [10]	z	$(z_{0,975} \cdot \sigma_z)$ [9]
$N_{ікр.} \sim h_0$	0,806	0,95	1,116	1,96
$N_{ікр.} \sim h_\tau$	0,778	0,95	1,040	1,96
$N_{ікр.} \sim Sh_0$	0,782	0,95	1,050	1,96
$N_{ікр.} \sim Sh_\tau$	0,703	0,95	0,873	1,96

Між критичним навантаженням $N_{ікр.}$ та товщинами наноплівок h_0, h_τ і величинами критеріїв гідродинамічних ефектів Sh_0, Sh_τ не існує тісного лінійного кореляційного зв'язку, але коефіцієнти кореляції достатньо високі (принаймні для α=0,4 такий зв'язок ймовірний) (табл. 3). Як видно з рис. 3, між цими величинами існує нелінійний зв'язок.

Критичне навантаження залежить від товщини наноплівки мастильної оливи на твердих поверхнях (рис. 5). Як видно з рис. 5, з підвищенням температури спостерігається звуження ділянки товщини наноплівки для різних мастил і її переміщення в область малих значень товщин плівки.

Експериментальні дані залежностей критичного навантаження на одну кульку $N_{ікр.}$ (y) від товщини мастильної плівки h_τ (x) в кінці 1 хв. випробувань на ЧКМТ чотирьох мастильних олив апроксимуються рівняннями:

20ºC $y = 0{,}0005x^3 - 0{,}1332x^2 + 10{,}639x + 0{,}3399, R^2 = 1$; (26)

35ºC $y = 0{,}0018x^3 - 0{,}3244x^2 + 18{,}812x - 60{,}69, R^2 = 1$ (27)

45ºC $y = -0{,}2616x^2 + 18{,}75x - 37{,}489, R^2 = 0{,}9972$; (28)

60ºC $y = -0{,}695x^2 + 34{,}538x - 134{,}28, R^2 = 0{,}9748$; (29)

90ºC $y = -1{,}4039x^2 + 43{,}276x - 48{,}191, R^2 = 0{,}8003$. (30)

Висновки

1. З підвищенням температури і навантаження в кульовому металічному контакті відбувається стоншення мастильної плівки до 5-10 нм для герцівського контакту та 8-17 нм в кінці 1хв. випробувань при зменшенні критерію гідродинамічного ефекту до величини порядку 10^{-16}-10^{-15} м^2, що приводить до критичного стану наноплівки мастильних олив, який завершується настанням прориву плівки і металічним контактом на окремих ділянках мікровиступів шорсткої поверхні.
2. Критичне навантаження залежить від товщини наноплівки мастильної оливи на твердих поверхнях. З підвищенням температури спостерігається звуження ділянки товщини наноплівки для різних мастил і її переміщення в область малих значень товщин плівки.

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

[1] Г.О. Сіренко, О.В. Кузишин. Зношування твердих тіл при наявності на їх поверхнях наноплівок мастильних матеріалів: оцінка гідродинамічних ефектів та розрахунок товщини плівки // *Фізика і хімія твердого тіла*, **5**(3), сс. 508-514 (2005).

[2] Г.О. Сіренко. *Створення антифрикційних композитних матеріалів на основі порошків термотривких полімерів та вуглецевих волокон*. Дис… доктора техн. наук: 05.16.06, Ін-т проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАНУ, К., 431 с. (1997).

[3] 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 // *Методы испытания на изнашивание*. АН СССР, М., сс. 152-163 (1962).

[4] Р.В. Гриневич, В.В. Цасюк, А.С. Смирнов. Специализированные машины трения // *Применение полимерных материалов*. Картя Молдовеняскэ, Кишинев, сс. 33-36 (1975).

[5] Г.А. Сиренко, А.С. Смирнов. Критерии оценки смазочной способности масел на четырехшариковой машине трения // *Труды Новочерк. политех. института «Вопросы теории трения, износа и смазки»*. **215**, сс. 38-42 (1969).

[6] J.K. Lancaster. Lubrication of carbon fibre-reinforced polymers: Part I – Water and aqueous solutions // *Wear*, **20**(3), pp. 315-333 (1972).

[7] J.K. Lancaster. Lubrication of carbon fibre-reinforced polymers: Part II – Organic Fluids // *Wear*, **20**(3), pp. 335-351 (1972).

[8] W.G. Robertson, D.T. Spillman // *Proc. Inst. Mech. Engr. Paper 1*, **180**(3K), pp. 49-60 (1966).

[9] М.Н. Степнов. *Статистическая обработка результатов механических испытаний*. Машиностроение, М., 232 с. (1972).

[10] Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. *Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий*. Наука, М., 280 с. (1976).

H.A. Sirenko, O.V. Kuzyshyn

Wearability of Solids When the Nanofilms of Lubrication Materials on Their Surfaces are Given: Dependence Films Thickness of Mineral Oils on Loading and Temperature

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

Estimations of lubricating layer thickness of mineral oils – aviation MC-20, compressor-12M, industrial-20, Vaseline (medicine) – and dependence films thickness of mineral oils on loading and temperature are given.