

АНТИФРИКЦІЙНІ ТА ФРИКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

УДК 621.762

*А. Г. Косторнов, д-р техн. наук, проф., акад. НАНУ,
О. І. Фуцич, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.,
В. Ф. Горбань, д-р техн. наук, провід. наук. співроб.,
Т. М. Чевичелова, наук. співроб.,
О. Д. Костенко, наук. співроб.*

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОСИНТЕЗУ ВТОРИННИХ СТРУКТУР У ЗОНІ ТЕРТЯ КОМПОЗИЦІЙНОГО АНТИФРИКЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ ЗА ШВИДКОСТІ КОВЗАННЯ 5 м/с І НЕЗНАЧНИХ ТИСКІВ

Інститут проблем матеріалознавства НАН України ім. І. М. Францевича

Досліджено тертя робочої пари вал (контртіло із сталі 65Г) – вкладиш (зразок із КАМ Fe – W – CaF₂) насухо на повітрі за підвищеної (5 м/с) швидкості ковзання і незначних (0,64 – 1,28 МПа) тисків. Установлено, що наслідком діючих при терті факторів і процесів являється: деформація поверхневих шарів матеріалу, які приймають участь у терті; синтез на поверхні матеріалу вторинних структурних мастильних плівок, котрі запобігають контакту робочих поверхонь пари тертя і визначають та забезпечують композиційному матеріалу необхідні антифрикційні властивості. Показано, що вторинні структурні мастильні плівки мають змінені, в порівнянні з вихідним матеріалом, хімічний і фазовий склад, структуру і структурний стан та підвищені механічні характеристики (твердості H_{IT} , модуля пружності E_{IT} , показника нормованої твердості H/E^ , характеристики повзучості C_{IT} і пружної деформації ϵ_{es}).*

Вступ та постановка проблеми. Інтенсивний розвиток техніки в області турбо – авіа – і ракетобудуванні, хімічній промисловості і т. д. диктує підвищення потреби в антифрикційних матеріалах, здатних працювати одночасно при підвищених і високих швидкостях ковзання та температурах. Високі швидкості ковзання приводять при терті до нагрівання їх робочих поверхонь. Більшість матеріалів, які працюють при підвищених і великих швидкостях ковзання очевидно будуть працездатні і за підвищених температур, оскільки названі швидкості ковзання індукують у їх поверхневих

шарах високі температури. Тому ці антифрикційні матеріали задовольняють практично одним і тим же вимогам [1]: мають високу стійкість проти зносу при терті без рідкого мастила, високу корозійну стійкість проти зносу в робочому середовищі і високі механічні міцність, твердість, теплопровідність та жароміцність при нагріванні. Матеріали, котрі працюють при підвищених (5–15 м/с) і високих (від 15 до 220 м/с) швидкостях ковзання і температурах, це самозмащувальні композиційні антифрикційні матеріали на основі міді, заліза і нікелю з високим вмістом твердих мастил, зміцнених легуючими компонентами, наприклад, хромом, нікелем, молібденом, кобальтом і т. д. [1].

Відомо [1], що під дією швидкості ковзання, прикладеного тиску і температури в зоні тертя при роботі матеріалу насуху на повітрі у ньому протікають процеси, котрі приводять до утворення на його поверхні тертя нових структур: мастильних плівок, котрі формуються при високій концентрації сухих твердих мастил у вихідному матеріалі; деформованих, змінених по складу, структурі, структурному стану і механічним властивостям тонких шарів матеріалу з включеннями твердих мастил, так званих суцільних вторинних структурних мастильних плівок, які формуються при порівняно менших їх концентраціях у матеріалі поза системи мастила*). Нові названі структури і визначають антифрикційність і працездатність матеріалу. Тонкі шари матеріалу з включеннями твердих мастил, сформовані на поверхні тертя матеріалу під дією тиску, швидкості ковзання і температури, далі у тесті статті будуть називатися вторинними структурними мастильними плівками, а скорочено – вторинними плівками.

Метою даної роботи являється: визначення антифрикційних властивостей КАМ Fe – W – CaF₂ при його роботі насуху на повітрі за швидкості ковзання 5 м/с і незначних (0,64 – 1,28 МПа) тисків; дослідження трибосинтезу вторинних структур – плівок у зоні тертя КАМ Fe – W – CaF₂ під дією заданих PV і температури, індукованої за цих умов у поверхні матеріалу; та вивчення складу плівок, їх структури, структурного стану, механічних характеристик і впливу на антифрикційні властивості КАМ.

Матеріал та методи дослідження. Нами був розроблений композиційний антифрикційний матеріал Fe–W–CaF₂, у якому зміцнення, яке привело до підвищення його механічних характеристик

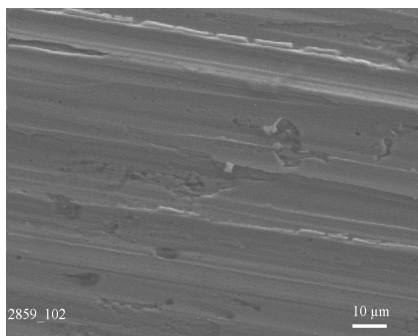
і жаростійкості, досягли легуванням заліза вольфрамом. Антифрикційність матеріалу забезпечили введенням до його складу фтористого кальцію, який виконує функцію твердого мастила. Фтористий кальцій CaF_2 підвищує граничні навантаження схоплення при терті пари, під час якого на її поверхні синтезуються вторинні структурні мастильні плівки. До температури 1151°C існує $\alpha - \text{CaF}_2$ з кубічною решіткою, вище 1151°C – розупорядкована модифікація тетрагональної сингонії; температура плавлення у цієї модифікації – 1418°C , щільність $3,18 \text{ г/см}^3$. Фтористий кальцій хімічно відносно пасивний, погано розчинний у воді (16 мг/л при 18°C), має відмінні механічні, технічні і експлуатаційні характеристики, високу оптичну однорідність і радіаційну стійкість і вважається відносно нешкідливим у силу малої розчинності у воді.

Зразки із КАМ Fe – W – CaF_2 отримали пресуванням суміші порошків з наступним їх спіканням у водні при температурі 1100°C на протязі 2 годин, їх допресуванням із наступним одногодинним відпалом у водні при 600°C . У процесі спікання порошкових композицій сформувалась мікрогетерогенна структура матеріалу, яка складається із несучої (матриці) і антифрикційної (твердого мастила) структурних складових. Матриця матеріалу – залізо, леговане вольфрамом у вигляді α -твердого розчину (табл. 1), приймає основне навантаження при терті. Твердим мастилом служить фтористий кальцій, який знаходиться у структурі матеріалу у вигляді включень (табл. 1, рис. 1).

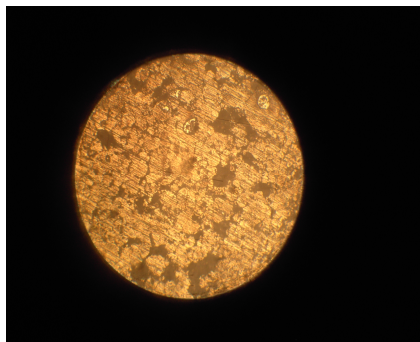
Таблиця 1

Фазовий склад КАМ Fe – W – CaF_2 і вторинних структурних мастильних плівок, синтезовані тертям на його поверхні за швидкості ковзання 5 м/с і різних тисків

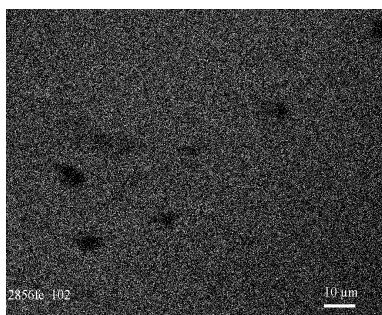
	Твердий розчин W в		CaF_2	FeO	Fe_3O_4	Fe_2O_3	Fe_7W_6
	$\alpha - \text{Fe}$	$\gamma - \text{Fe}$					
КАМ	95,7	—	4,3	—	—	—	—
Тиск, МПа	Вміст фаз у вторинних плівках, синтезовані тертям на поверхні КАМ, мас. %						
0,64	47,36	—	3,04	23,73	22,46	—	3,41
0,96	47,69	12,33	3,64	32,74	—	—	3,60
1,28	49,92	14,75	3,98	27,17	—	0,66	3,52



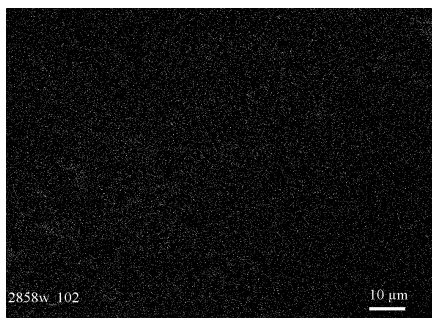
a



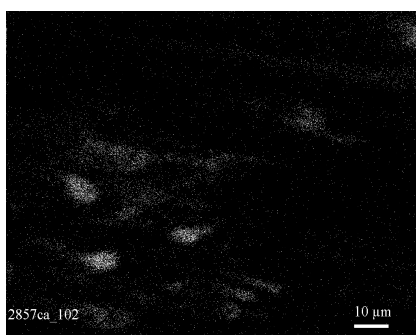
б



в



з



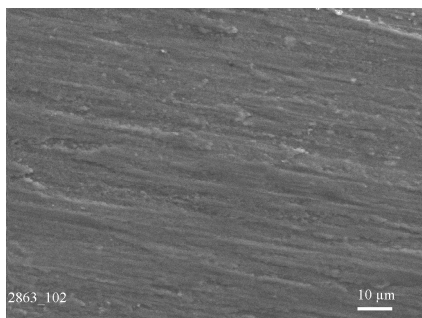
д

Рис. 1. Структура КАМ Fe – W – CaF₂: *a* – $\times 1000$; *б* – $\times 300$.
Розподіл у його структурі (*a*): *в* – заліза; *з* – вольфраму; *д* – кальцію;
 $\times 1000$

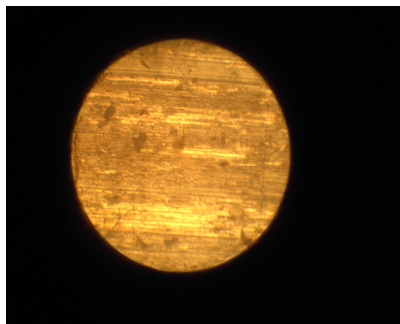
Фтористий кальцій був вибраний по наступним причинам. Відомо [1; 2–6], що він, як і інші фтористі сполуки (BaF_2 і MgF_2), відрізняються високою хімічною і термічною стійкістю. Автори роботи [2] установили, що фтористий кальцій, магній і барій при температурі 1100°C на повітрі, а також у водні володіють достатньо високою термостійкістю і показали високий опір окисненню. Ці данні свідчать, що при спіканні спресованих порошкових композицій, у склад яких входять в якості твердих мастил CaF_2 , BaF_2 або MgF_2 , а також при їх роботі на повітрі при високих температурах або великих швидкостях ковзання останні не розкладаються і не взаємодіють із складовими матеріалу і таким чином зберігають свої мастильні властивості [2–6]. Тому вони рекомендуються в якості твердих мастил для матеріалів, працюючих насухо на повітрі при підвищених і високих швидкостях ковзання та температурах, у той час як більшість твердих мастильних сполук на повітрі при температурах, вищих за $400\text{--}450^\circ\text{C}$, втрачають свої мастильні властивості.

Наприклад, дисульфід молібдену MoS_2 , як тверде мастило, активує процес утворення необхідної структури матеріалу і формування вторинних структурних мастильних плівок. Він немагнітний, електропровідний і стійкий до ядерних реакцій, стійкий до інертних масел, кислот і металічних поверхонь. Щільність MoS_2 складає $5,16 \text{ г/см}^3$; $T_{\text{пл.}}=1685^\circ\text{C}$. Дисульфід молібдену розчинний тільки в HNO_3 і царській воді [7]. До недоліків дисульфиду молібдену відноситься те, що він володіє високою хімічною активністю і відносно легко вступає у реакцію з водою і киснем. Процес окиснення починається за температури вище 400°C ; за температури $400\text{--}427^\circ\text{C}$ на його поверхні утворюється плівка оксиду, далі окиснення прискорюється і при 529°C завершується повним переходом у MoO_3 , який не володіє мастильними властивостями і являється абразивним. Внаслідок цього при контакті MoS_2 з повітрям максимально допустиму температуру обмежують 450°C . Тому інтервал робочих температур дисульфиду молібдену на повітрі та матеріалів, котрі містять його в якості твердого мастила, $-150\text{--}450^\circ\text{C}$.

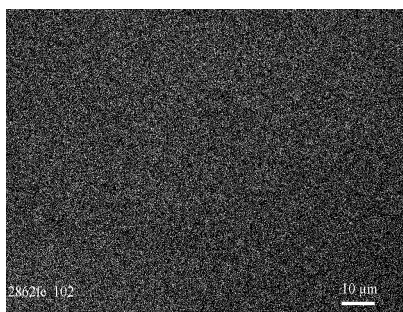
Структуру вихідного матеріалу $\text{Fe} - \text{W} - \text{CaF}_2$ і вторинних мастильних плівок, які синтезувались тертям під час роботи в парі зі сталлю 65Г на його поверхні, дослідили за допомогою мікроскопів металографічного МІМ-8 (рис. 1, б; 2–4, б і 4, в) та електронного SEM



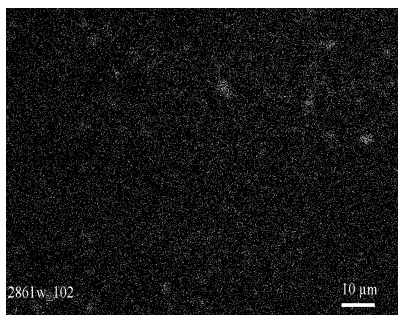
a



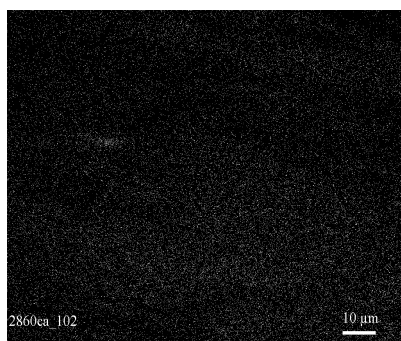
б



в

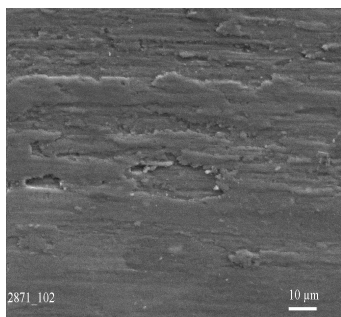


г

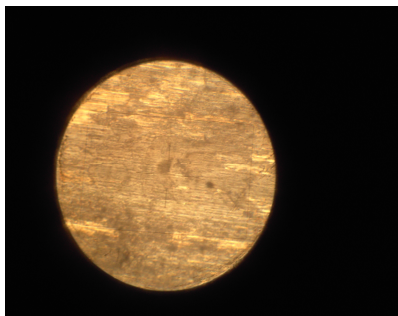


д

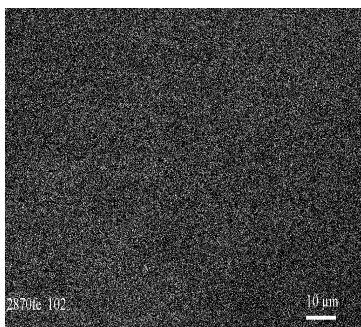
Рис. 2. Структура вторинної мастильної плівки: *a* – $\times 1000$; *б* – $\times 300$; синтезованої тертям на поверхні КАМ Fe – W – CaF₂ при швидкості ковзання 5 м/с і тиску 0,64 МПа. Розподіл у її структурі (*а*): заліза (*в*); вольфраму (*г*); кальцію (*д*); $\times 1000$



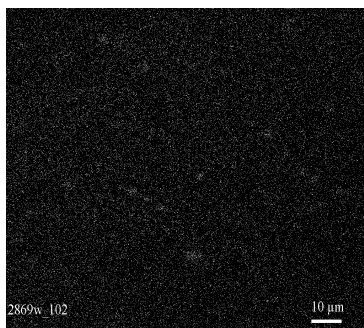
a



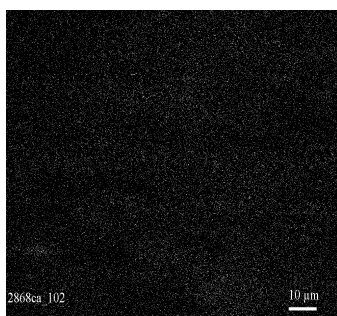
б



в

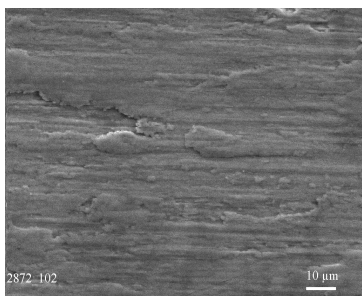


г

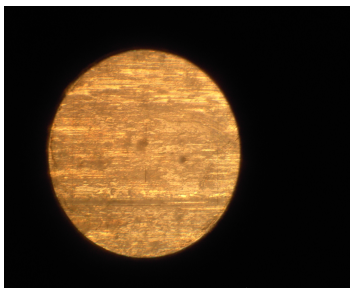


д

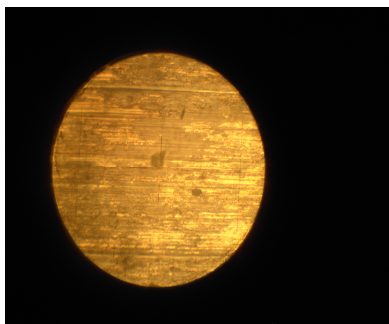
Рис. 3. Структура вторинної мастильної плівки: *a* – $\times 1000$; *б* – $\times 300$; синтезованої тертям на поверхні КАМ Fe – W – CaF₂ при швидкості ковзання 5 м/с і тиску 0,96 МПа. Розподіл у її структурі (*a*): заліза (*в*); вольфраму (*г*); кальцію (*д*); $\times 1000$



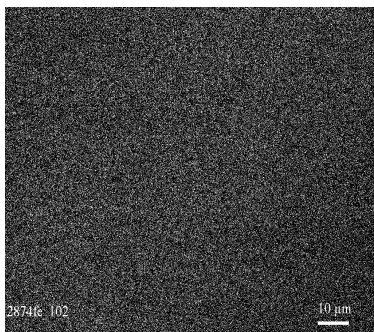
a



б



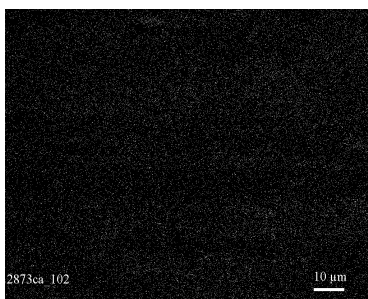
в



г



д



е

Рис. 4. Структура вторинної мастильної плівки *a* – $\times 1000$; *б* – $\times 300$; синтезованої тертям на поверхні КАМ Fe – W – CaF₂ при швидкості ковзання 5 м/с і тиску 1,28 МПа та плівки, на поверхні валу (*в* – $\times 300$). Розподіл у її структурі (*a*): кальцію (*г*); заліза (*д*); вольфраму (*е*) $\times 1000$

(рис. 1, а і 2, а); розподіл елементів у структурі матеріалу КАМ і синтезованих на його поверхні плівок – мікроаналізатора Superprobe –733 (рис. 1–4), їх фазовий склад – рентгенівської установки Дрон (табл. 1); їх механічні характеристик – мікроіндентування на установці «Мікрон–гама» (табл. 2) при кімнатній температурі (навантаження 100 г) алмазною пірамідою Берковича ($\alpha = 65^\circ$) по методиці, викладеній у роботі [8]. Точність визначення навантаження P складає 10^{-3} Н, глибина h впровадження індентора – $\pm 2,5$ нм. Значення характеристик $P_{\max}$, $h_{\max}$, H , E^* , E визначались, обраховувались і фіксувались [8]. Визначення твердості H_{IT} , модуля пружності E_{IT} проводилось відповідно ISO 14577-2002.

Таблиця 2

Механічні характеристики КАМ Fe – W – CaF₂ і вторинних структурних мастильних плівок, синтезовані тертям на його поверхні за швидкості ковзання 5 м/с і різних тисків (при $P = 100$ г)

	H_{IT}	H/E^*	C_{IT}	ε_{es}
Вихідний КАМ	2,85	0,026	1,6	0,8
Тиск, МПа	Вторинні плівки, синтезовані тертям на поверхні КАМ; шлях тертя склав 24 км			
0,64	4,6	0,039	1,8	1,0
0,96	4,7	0,037	2,0	1,2
1,28	4,8	0,038	1,9	1,18

Триботехнічні випробування КАМ Fe – W – CaF₂ (табл. 3) провели на машині тертя МТ – 68М по ГОСТ 26614–85 по схемі вал (контртіло із сталі 65Г твердістю HRC 55–57 і шерехатістю $R_a=0,2$) – вкладиш (зразок із КАМ) [9].

Результати досліджень та їх обговорення. З метою вивчення антифрикційних властивостей КАМ Fe–W–CaF₂ при швидкості ковзання 5 м/с і незначних (0,64; 0,96 і 1,28 МПа) тисках та отримання об'єктів дослідження – вторинних структурних мастильних плівок, синтезованих у процесі сухого тертя матеріалу на його поверхні, були проведені триботехнічні випробування КАМ на повітрі насухо за наведених умов ($P_1V=3,2$; $P_2V=4,8$; $P_3V=6,4$ МПа·м/с). Шлях тертя склав 24 км. Результати випробувань приведені у табл. 3.

Із табл. 3 витікає, що при швидкості ковзання 5 м/с із зростанням навантаження на пару тертя у два рази з 0,64 МПа до 1,28

МПа: коефіцієнт тертя матеріалу зменшується незначно з 0,3 до 0,28 (в 1,08 раз); знос матеріалу зростає з 0,0255 мг/км до 0,0572 мг/км (в 2,2 раз).

Швидкість ковзання і прикладений тиск стимулюють нагрівання робочої поверхні матеріалу до значних температур. Сумарна дія вказаних факторів приводить до синтезу тертям суцільних вторинних структурних мастильних плівок на поверхні КАМ. Як показали результати робіт [1; 10–14] та досліджень, проведених у цій роботі, вторинні плівки відрізняються від вихідного КАМ складом, структурою, структурним станом та механічними характеристиками і визначають антифрикційні та експлуатаційні властивості матеріалу. Результати досліджень синтезованих вторинних плівок приведені нижче.

Таблиця 3

Триботехнічні характеристики композиційного антифрикційного матеріалу Fe – W – CaF₂

$P_1=0,64 \text{ МПа};$ $P_1V=3,2 \text{ МПа} \cdot \text{м/с},$		$P_2=0,96 \text{ МПа};$ $P_2V=4,8 \text{ МПа} \cdot \text{м/с}$		$P_3=1,28 \text{ МПа}$ $P_3V=6,4 \text{ МПа} \cdot \text{м/с}$	
$V=5 \text{ м/с}; S=24 \text{ км}$					
f	$I, \text{ мг/км}$	f	$I, \text{ мг/км}$	f	$I, \text{ мг/км}$
0,3	0,0255	0,29	0,04	0,28	0,0572

f – коефіцієнт тертя; I – знос.

Структура матеріалу Fe – W – CaF₂ і синтезованих у процесі тертя вторинних мастильних плівок та розподіл у них заліза, вольфраму і кальцію приведені на рис. 1–4. Результати їх рентгенівського аналізу приведені у табл. 1.

Із рис. 1 видно, що вольфрам розподілений в основі (залізі) вихідного матеріалу рівномірно, а кальцій, який з фтором утворює фтористий кальцій, розподілений переважно у вигляді включень. Фтористий кальцій із залізом не взаємодіє, що чітко витікає з рис. 1, в, д; CaF₂ – це темні включення в залізі (рис. 1, в), які співпадають з його розподілом у структурі матеріалу (рис. 1, д). Структура вихідного КАМ мікрогетерогенна і представляє собою твердий розчин вольфраму в α – залізі, у якому розподілений фтористий кальцій (див. табл. 1). Матриця матеріалу відповідає за його несучу здатність, а CaF₂ виконує при сухому терті роль твердого мастила. Вторинні структурні плівки (рис. 2–4) також складається із всіх

складових вихідного КАМ – заліза, вольфраму і кальцію (CaF_2), але в залежності від прикладеного до робочої пари тиску (0,64; 0,96 і 1,28 МПа) їх розподіл у залізі змінюється, що пов'язано з формуванням у процесі тертя цими компонентами нових фаз (див. табл. 1). У порівнянні з розподілом частинок вольфраму і включень фтористого кальцію та їх щільністю у вихідному матеріалі (рис. 1, *з, д*) при навантаженні пари тертя та її ковзанні у складі вторинних плівок присутні конгломерати частинок вольфраму, однак із збільшенням тиску розміри конгломератів частинок вольфраму незначно зменшуються (рис. 2–4, *з*); розміри включень фтористого кальцію також зменшуються (рис. 2–4, *д*). Перелічені зміни відбулися за рахунок деформації під дією тиску і швидкості ковзання поверхневих шарів матеріалу, які приймали участь у терті, і котрі привели до синтезу на поверхні пари тертя – КАМ (рис. 2–4, *а, б*) і сталі 65Г (рис. 4, *в*) вторинних плівок з включеннями твердого мастила, фазовий склад котрих залежатиме від режиму роботи (табл. 1 і рис. 2). Такі вторинні плівки володіють великою адгезією до КАМ і сталі 65Г [15] і запобігають механічному контакту робочих поверхонь, витримуючи підвищені швидкості ковзання. Слід зауважити, що проникна здатність променів рентгенівської установки Дрон, з допомогою якої проведений рентгенофазовий аналіз вторинних плівок, не вище 13 мкм. Це означає, що при проведенні рентгенівського аналізу поверхонь тертя аналізуємо фазовий і хімічний склад сформованих під час роботи вторинних структурних мастильних плівок (рис. 2–4, *а, б* і 4, *в*), товщина яких, згідно літературним даним [15], може бути до 60 мкм.

При введеній у вихідний матеріал кількості вольфраму і температури його синтезу останній утворює із залізом α – твердий розчин (табл. 1). Fe_bcc – це Fe з ОЦК решіткою; Fe_Gamma з ГЦК решіткою.

При терті за наведених (PV) умов роботи на поверхні робочої пари синтезувались вторинні мастильні плівки складної структури, яка складається із матриці (несучої) і твердого мастила (антифрикційної) структурних складових (див. табл. 1, рис. 2). Матрицею вторинних мастильних плівок є твердий розчин вольфраму в α – залізі (при $PV=0,64\cdot5$ МПа·м/с) або суміш його твердих розчинів в α – і γ – залізі (при $PV=0,96\cdot5$ і $1,28\cdot5$ МПа·м/с), зміцнений синтезованими в ньому інтерметалідами Fe_7W_6 (на рис. 2–4 – це скупчення вольфраму).

Із збільшенням тиску до 1,28 МПа кількість твердого розчину вольфраму в матриці плівки неістотно зростає як в α – Fe_{бес} з 47,36 до 49,92 %, так і в γ – Fe_{Gamma} з 12,33 до 14,75 %, а вміст інтерметалідами Fe₇W₆ практично не змінюється і знаходиться в межах помилки аналізу (3,41– 3,60 %; табл. 1). Неістотним збільшенням в матриці вторинних плівок твердого розчину вольфраму в α – і γ – залізі та незмінною кількістю в них інтерметалідів Fe₇W₆ пояснюється незначна зміна механічних характеристик плівок, тобто тонких шарів матеріалу, синтезованих на поверхні тертя КАМ за різних тисків при сталій (5 м/с) швидкості ковзання (див. табл. 2).

У структурі плівок містяться включення фтористого кальцію CaF₂ і оксиди заліза Fe₃O₄ (магнетит), Fe₂O₃ (гематит) і FeO (в'юстит). Оксиди заліза (основа КАМ – залізо) зароджуються, формуються і pojawiaються у плівках внаслідок окиснення заліза у процесі тертя КАМ на повітрі. Згідно з роботою [15], оксиди заліза володіють мастильними властивостями і утворюються на поверхні тертя матеріалу за різних температур: при нагріві її до температури 225°C утворюються зони зародження оксиду заліза типу Fe₂O₃ з α – структурою (з ОЦК решіткою); вище температури 225°C в оксиді заліза типу Fe₂O₃ відбуваються структурні зміни і α – Fe₂O₃ поступово частково перетворюється за температури 400°C у модифікацію Fe₃O₄ з γ – структурою (з ГЦК решіткою); нагрівання поверхні тертя матеріалу до температури 450 – 570°C і вище приводить до появи на межі з залізом нової фази в'юстита (FeO).

Таким чином, фтористий кальцій CaF₂ і утворені у процесі тертя матеріалу оксиди заліза виконують у структурі вторинних плівок роль твердого мастила – антифрикційної структурної складової (див. табл. 1). Як видно, синтезовані в процесі тертя фази виконують у структурі вторинних плівок різну роль і впливають по-різному на його триботехнічні і механічні характеристики.

Отже, структура вторинних мастильних плівок, синтезованих тертям на поверхні КАМ, є мікрогетерогенною, у якій матриця представляє собою α – або суміш α – і γ – твердих розчинів вольфраму у залізі, зміцнена утвореними в процесі тертя інтерметалідами Fe₇W₆, а тверде мастило – це фтористий кальцій і утворені оксиди заліза, які володіють мастильними властивостями.

Фазовий склад вторинних структурних мастильних плівок, синтезованих під тиском 0,64 МПа за швидкості ковзання 5 м/с,

відрізняється від фазового складу вихідного матеріалу кількістю твердого розчину вольфраму в α – Fe, вмістом фтористого кальцію CaF_2 , наявністю інтерметалідів Fe_7W_6 та оксидів FeO і Fe_3O_4 з α – структурою і ОЦК решіткою (див. табл. 1). Фазовий склад вторинних плівок, сформованих під тиском 0,96 і 1,28 МПа за швидкості ковзання 5 м/с, відрізняється від фазового складу вихідного матеріалу і вторинних плівок, сформованих при меншому тиску (0,64 МПа) не тільки збільшеною кількістю фтористого кальцію, але й відсутністю оксиду Fe_3O_4 . Останні містять тільки оксид FeO , який, як було зазначено вище, утворюється за температур 450 – 570°C (див. табл. 1). Даний результат свідчить про те, що в залежності від режиму тертя робочі поверхні КАМ Fe – W – CaF_2 нагріваються до різних температур. Крім того, наявність у вторинних плівках інтерметалідів Fe_7W_6 свідчить, що температура, індукована тертям в робочій поверхні, може бути вищою за 570°C. Такі високі температури сприяють, згідно результатам роботи [15], формуванню у структурі вторинних мастильних плівок зони зародженню оксидів, котрі сприяють збільшенню адгезії до робочої поверхні КАМ плівок і зростанню міцності та товщини останніх. Вторинні структурні мастильні плівки із – за присутності в них твердого мастила (фтористого кальцію і синтезованих оксидів заліза, які володіють мастильними властивостями,) зменшують коефіцієнт тертя КАМ Fe – W – CaF_2 і запобігають механічному контакту робочих поверхонь пари тертя, витримуючи підвищені швидкості ковзання.

Таким чином, фазовий склад вторинних структурних мастильних плівок, синтезованих тертям за різних тисків на поверхні КАМ, різний. Вони відрізняється між собою і від фазового складу вихідного матеріалу структурою твердих розчинів і їх кількістю; процентним вмістом фтористого кальцію; наявністю і розміром синтезованих інтерметалідів Fe_7W_6 , котрі на рис. 2–3, з, рис.4, д, сприймаються як конгломерати вольфраму; та наявністю, видом і кількістю в них оксидів заліза (див. табл. 1)

Комплекс механічних характеристик (твердість H_{IT} , показник нормованої твердості H/E^* , характеристики повзучості C_{IT} і пружної деформації ϵ_{es}) КАМ Fe – W – CaF_2 і вторинних структурних мастильних плівок, синтезованих за різних тисків (0,64; 0,96 і 1,28 МПа) при швидкості ковзання 5 м/с, приведений у табл. 2.

По величині співвідношення між величинами H/E^* судять про структурний стан КАМ $Fe - W - CaF_2$ і синтезованих вторинних мастильних плівок, оскільки відомо: якщо співвідношення $H/E^* \approx 0,05 - 0,09$, то структура матеріалу буде дрібнокристалічного або нанокристалічного стану з розміром зерна меншим за 100 нм; якщо $H/E^* = 0,00 - 0,05$, то структура матеріалу буде більш крупнозерниста з розміром зерна більшим за 100 нм. З величини показника нормованої твердості H/E^* (табл. 3), можна зробити наступний висновок: структура як вихідного матеріалу, так і вторинних мастильних плівок крупнозерниста з розміром зерна до 100 нм; розмір зерна вихідного матеріалу є більшим ($H/E^* = 0,026$) за розмір зерна вторинних мастильних плівок ($H/E^* = 0,037 - 0,039$) приблизно в 1,5 раз.

Отже, в умовах сухого тертя КАМ на повітрі під дією тиску і швидкості ковзання має місце роздрібнювання зерна, однак це дроблення при наведених умовах роботи (PV) не приводить вторинні мастильні плівки до дрібнокристалічного стану, як це мало місце в роботі [14]. Оскільки відбувається дроблення зерна вторинних мастильних плівок, то можна припустити: із збільшенням тиску чи швидкості ковзання, що має місце при роботі матеріалу в реальному вузлі тертя, результатом роздрібнювання зерна може бути поступовий перехід вторинних мастильних плівок до дрібнокристалічного стану, який забезпечить робочій парі високу працездатність, зносостійкість і довговічність.

Процеси, котрі відбуваються під тиском та швидкістю ковзання при сухому терті на повітрі, приводять до зростання твердості вторинних плівок, яка в 1,65 раз вища за твердість вихідного матеріалу (табл. 2). Очевидно, зростання твердості плівок можна пояснити: роздрібнюванням їх зерна; синтезом в них інтерметалідів Fe_7W_6 (рис. рис.2–3, з, рис.4, д), зменшенням в них розмірів включень фтористого кальцію (рис. рис. 2–3, д, рис.4, е). Величина тиску, прикладеного до пари тертя, не вплинула при швидкості ковзання 5 м/с на величину твердості вторинних мастильних плівок. Як під тиском 0,64 МПа, так і під тисками 0,96 і 1,28 МПа їх твердість H_T становить в середньому 4,7 МПа (див. табл. 2). Незначну зміну твердості вторинних плівок (4,6 – 4,8), сформованих за тисків 0,64 – 1,28 МПа, можна пояснити відсутністю дроблення їх зерен за даний фіксований час ($H/E^* = 0,037 - 0,39$ плівок) і не-

значною зміною вмісту утворених у них у процесі тертя інтерметалідів Fe_7W_6 ($3,41 \div 3,60$ %; див. табл. 1).

Аналіз даних табл. 2 показує: показник схильності до релаксації напруг вихідного КАМ $\text{Fe} - \text{W} - \text{CaF}_2$ ($C_{\text{П}}=1,6$) є меншим від цього показника вторинних мастильних плівок ($C_{\text{П}}=1,8 - 2,0$) в $1,13 \div 1,25$ раз; схильність вторинних мастильних плівок до релаксації напруг з підвищенням тиску від $0,64$ до $1,28$ МПа достатньо висока і зростає по мірі його збільшення від $1,8$ до $2,0$ (табл. 2). Ці результати свідчать про те, що вторинні структурні мастильні плівки, синтезовані тертям під тиском за підвищеної швидкості ковзання на поверхні матеріалу за його роботи без рідкого мастила, мають схильність до релаксації напруг, що є одним із факторів, котрий забезпечує композиційному антифрикційному матеріалу невеликий знос і надійну працездатність при наведених умовах роботи.

Пружна деформація вихідного КАМ $\text{Fe} - \text{W} - \text{CaF}_2$ ($\epsilon_{\text{с}}=0,8$) є меншою від $\epsilon_{\text{с}}$ вторинних мастильних плівок ($\epsilon_{\text{с}}=1,0 - 1,2$), синтезованих за тисків $0,64 - 1,28$ МПа, відповідно в $1,25$ і $1,5$ разів, що також є одним із факторів, котрий забезпечує композиційному антифрикційному матеріалу високу зносостійкість і надійну працездатність при наведених умовах роботи.

Висновки. Досліджені антифрикційні властивості композиційного матеріалу $\text{Fe} - \text{W} - \text{CaF}_2$ в парі зі сталлю 65Г на повітрі насухо за підвищеної швидкості ковзання 5 м/с і незначних ($0,64 - 1,28$ МПа) тисків.

Установлено:

1. При швидкості ковзання 5 м/с із зростанням навантаження на пару тертя у два рази з $0,64$ МПа до $1,28$ МПа: коефіцієнт тертя матеріалу зменшується незначно з $0,3$ до $0,28$ (в $1,08$ раз); знос матеріалу зростає з $0,0255$ мг/км до $0,0572$ мг/км (в $2,2$ раз).

2. Робота пари тертя вал (контртіло із сталі 65Г) – вкладиш (зразок із КАМ $\text{Fe} - \text{W} - \text{CaF}_2$ на повітрі насухо за підвищеної (5 м/с) швидкості ковзання, незначних ($0,64 - 1,28$ МПа) тисків і високих (до 570°C) температур, до яких нагрівається поверхня матеріалу тертям, супроводжується: деформацією поверхневих шарів матеріалу, які приймають участь у терті; синтезом вторинних структурних мастильних плівок на поверхні КАМ із зміненими, у порівнянні з вихідним матеріалом, хімічним і фазовим складом,

структурою, структурним станом і підвищеними механічними характеристиками, котрі запобігають контакту робочих поверхонь пари тертя і визначають оптимальні триботехнічні характеристики КАМ Fe – W – CaF₂ та забезпечують йому необхідні експлуатаційні властивості.

3. Структура вихідного КАМ є мікрогетерогенною і представляє собою твердий розчин вольфраму в α – залізі, у якому розподілений фтористий кальцій (табл. 1). Матриця матеріалу відповідає за його несучу здатність, а CaF₂ виконує при сухому терті роль твердого мастила

3. Структура синтезованих тертям вторинних мастильних плівок є також мікрогетерогенною, але у ній матриця представляє собою α – або суміш α – і γ – твердих розчинів вольфраму в залізі, зміцнена утвореними в процесі тертя інтерметалідами Fe₇W₆, а тверде мастило – це фтористий кальцій і синтезовані оксиди заліза, які володіють мастильними властивостями.

4. Синтезовані у процесі тертя вторинні структурні мастильні плівки запобігають механічному контакту поверхонь пари тертя і визначають та забезпечують йому необхідні антифрикційні та експлуатаційні властивості

Список літератури

1. Федорченко И. М. Композиционные спеченные антифрикционные материалы / И.М.Федорченко, Л.И.Пугина.– К.: Наук. думка, 1980. – 440 с.
2. Мирошников В. Н. О выборе твердых смазок / В. Н.Мирошников, Ю.Ф. Шевчук // Порошковая металлургия. – 1971. – № 11. –С. 72–77.
3. Пат. 48–17684 (Япония). Сложные материалы, устойчивые против высокотемпературного окисления на воздухе, содержащие фториды в качестве смазки / Окагэ Сай, Окагэ Масахико / Опубл. – 31.05.73.
4. А. с. 433234 (СССР). Антифрикционный металлокерамический материал на основе железа / Федорченко И. М., Шевчук Ю. Ф., Мирошников В. Н. / Опубл. Б. И. – 1974.– № 23.
5. А. с. 456015 (СССР). Спеченный антифрикционный материал на основе никеля / Пугина Л. И., Федорченко И. М. и др. // Опубл. Б. И.— 1975.–№ 1.
6. Федорченко И. М. О смазочных свойствах фтористого кальция / И.М.Федорченко, В.Д.Зозуля, Ю.Ф. Шевчук // Порошковая металлургия. – 1970. – № 10. – С. 44–47.
7. Химическая энциклопедия в 5 Т.: / Редколлегия: Кнунянц И.Л. и др.–М.: Большая Российская энциклопедия. Т. 3 – 1992. –639 с.

8. Фирстов С. М., Горбань В. Ф., Печковский Э. П., Мамека Н. А. Уравнение индентирования // Доп. НАН України. — 2007. — № 12. — С. 100 — 106.

9. ГОСТ 26614—85. Материалы антифрикционные порошковые. Метод определения триботехнических свойств. — М.: Государственный комитет СССР по стандартам. — 1985. — 9 с

10. Косторнов А. Г. Визначальний вплив трибосинтезу нових структур у зоні тертя на експлуатаційні властивості антифрикційних матеріалів / С.Ю.Мімеонова, О.І.Фушич, Т.М.Чевичелова та інші. // Проблеми тертя і зношування. Наук.-техн. зб. — К: НАУ, — 2006. — Вип. 46. —С. 84—94.

11. Косторнов А. Г. Влияние определяющих параметров процесса сухого трения на формирование структуры зоны трибосинтеза в композициях на медной основе / А.Г.Косторнов, Ю.М.Симеонова., О.И.Фушич, Т.М.Чевычелова, А.Д. Костенко // Порошковая металлургия. — 2006. —№ 3/4. — С.14—21.

12. Косторнов А. Г. Закономерности трения, износа и целенаправленного синтеза поверхностей трения композиционных самосмазывающихся материалов / А.Г.Косторнов, О.И.Фушич, Т.М.Чевычелова, Ю.М.Симеонова, А.Д. Костенко // Порошковая металлургия. — 2007. — №.3/4. —С. 109—121.

13. Косторнов А. Г. Связь триботехнических свойств самосмазывающегося композиционного материала на основе меди с упруго — пластическими характеристиками зоны трибосинтеза / А.Г.Косторнов, О.И.Фушич, В.Ф.Горбань, Т.М.Чевычелова, А.Д.Костенко // Порошковая металлургия. — 2008. — №. 11/12. —С. 63—70.

14. Косторнов А. Г. Структурные и фазовые превращения в зоне трибосинтеза самосмазывающегося композиционного материала на основе меди / А.Г.Косторнов, О.И.Фушич, Т.М.Чевычелова, А.Ю.Коваль, А.Д.Костенко // Порошковая металлургия. — 2009. —№. 5/6. —С. 139—146.

15. Крагельский И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. —М.: Машиностроение, 1968. — 478 с.

Косторнов А. Г., Фушич О. І., Горбань В. Ф., Чевичелова Т. М., Костенко О. Д. Вплив параметрів сухого тертя на формування вторинних структур у зоні трибосинтезу композиційного антифрикційного матеріалу на основі заліза // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. — К.: НАУ, 2012. — Вип. 57. — С.170—187.

Исследовано трение пары вал (контртело из стали 65Г) — вкладыш (образец из КАМ Fe — W — СаF₂) всухую на воздухе при повышенной (5 м/с) скорости скольжения и незначительных (0,64—1,28 МПа) давлениях. Установлено, что следствием действующих при трении факторов и процессов является: деформация поверхностных слоев материала, которые

принимают участие в трении; синтез на поверхности исходного материала вторичных структурных смазывающих пленок, которые препятствуют контакту рабочих поверхностей пары трения и определяют и обеспечивают КАМ необходимые антифрикционные свойства. Показано, что вторичные пленки имеют измененные, по сравнению с исходным материалом, химический и фазовый состав, структуру и структурное состояние, а также повышенные механические характеристики (твердости H_{IT} , модуля упругости E_{IT} , показателя нормированной твердости H/E^* , характеристик ползучести C_{IT} и упругой деформации ϵ_{es}).

Рис. 4, табл. 3, список лит.: 15 наим.

Kostornov G., Fushchych O.I., Gorban' V.F., Chevychelova T.M., Kostenko O.D. Investigation of the tribosynthesis of secondary structures in the friction zone of a composite antifriction material at a sliding speed of 5 m/sec and insignificant pressures

The friction of a shaft (rider of 65G steel)–insert (specimen of a Fe–W–CaF₂ composite antifriction material) working pair without lubrication at an increased (5 m/sec) sliding speed and insignificant (0.64–1.28 MPa) pressures in air has been investigated. It has been established that the consequences of factors and processes acting in friction are as follows: (a) deformation of surface layers of the material that take part in friction; (b) synthesis of secondary structural lubricating films, which prevent the contact of the working surfaces of the friction pair and provide required antifriction properties of the composite material. It is shown that the secondary structural lubricating films have a changed chemical composition and phase composition against those of the initial material and increased mechanical characteristics (hardness H_{IT} , modulus of elasticity C_{IT} , index of normalized hardness H/E^* , creep characteristic C_{IT} , and elastic strain characteristic ϵ_{es}).

Ключеві слова: композиційний антифрикційний матеріал (КАМ), вторинні структурні мастильні плівки, склад, структура, швидкість ковзання, тиск, температура, тертя, коефіцієнт тертя, знос, синтез, механічні властивості.

Ключовые слова: Композиционный антифрикционный материал, вторичные структурные смазывающие пленки, состав, структура, скорость скольжения, давление, температура, трение, коэффициент трения, износ, синтез, механические свойства.

Keywords: composite antifriction material (CAM), secondary structural lubricating films, composition, structure, sliding speed, pressure, temperature, friction coefficient, wear, synthesis, mechanical properties.

Стаття надійшла до редакції 20.02.2012