

УДК 621.762

А. Г. КОСТОРНОВ, О. І. ФУЩИЧ, Т. М. ЧЕВИЧЕЛОВА, М. В. КАРПЕЦЬ,
О. Д. КОСТЕНКО

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

ВПЛИВ ТРИБОСИНТЕЗУ НОВИХ СТРУКТУР У ЗОНІ ТЕРТЯ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ САМОЗМАЩУВАЛЬНОГО КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ НА ОСНОВІ МІДІ

Досліджено синтез вторинних структур на поверхні тертя самозмащувального композиційного матеріалу на основі міді $Cu-Sn-P-MoS_2$, при роботі у вакуумі $2 \cdot 10^{-5}$ мм. рт. ст. у парі зі сталлю ШХ15 при тисках 2,5 і 5,0 МПа та швидкості ковзання 1 м/с. Показано, що працездатність матеріалу СКАМ у вакуумі обумовлена особливостями його структурної побудови і функціональною адаптацією до умов експлуатації завдяки трибосинтезу на робочих поверхнях вторинних плівок — шару матеріалу нової структури, відмінного по хімічному і фазовому складу, структурному стані та механічним властивостям від основного вихідного матеріалу.

Ключові слова: самозмащувальний композиційний матеріал, мікрогетерогенна структура, матриця, тверде мастило, фаза, спікання, структурний стан, мікрромеханічні властивості.

Вступ. В попередніх роботах [1–6] встановлено, що у вакуумі працездатність самозмащувальних композиційних матеріалів класу ПІМ на основі міді (далі СКАМ), котрі містять різні легувальні (Mn, Sn, Ni) і мастильні (Pb, MoS_2) компоненти, обумовлена особливостями їх структурної побудови і функціональною адаптацією до умов експлуатації завдяки трибосинтезу на робочих поверхнях шару матеріалу, відмінного по хімічному і фазовому складу, структурному стану та механічним властивостям від основного вихідного матеріалу. Показано, що вони мають мікрогетерогенну структуру, яка складається з матриці і твердого мастила та забезпечують легкість ковзання робочої пари в процесі сухого тертя у вакуумі і працездатність трибосистеми в цілому.

Нижче буде показано, що у вакуумі працездатність СКАМ $Cu-Sn-P-MoS_2$ [7] так само, як і названих вище самозмащувальних композиційних [1–6], забезпечується особливостями його структурної побудови та функціональною адаптацією до заданих умов роботи завдяки формуванню і синтезу на поверхні тертя вторинних змащувальних плівок, або, як їх ще називають, вторинних структур.

Мета роботи. Вивчення процесу формування і синтезу на поверхні тертя вторинних змащувальних плівок, відповідальних за триботехнічні характеристики матеріалу СКАМ при швидкості 1 м/с і тисках 2,5 і 5 МПа.

Об'єкт дослідження. Вторинні змащувальні плівки, сформовані і синтезовані на поверхні зразків з матеріалу $Cu-Sn-P-MoS_2$ у процесі його тертя у вакуумі $2 \cdot 10^{-5}$ мм. рт. ст. у парі зі сталями типу ШХ15 твердістю HRC 55-57 і шорсткістю R_a 0,2.

Структуру і фазовий склад експериментального СКАМ $Cu-Sn-P-MoS_2$ і вторинних змащувальних структур досліджували за допомогою мікроскопу МІМ-8, їх фазовий склад — рентгенівської установки ДРОН, а їх механічні властивості оцінювали мікроіндентуванням на установці «Мікрон-гама» [8–9].

Фазовий склад знімали в $Fe K_{\alpha}$ – випромінюванні в інтервалі кутів $2\theta = 10^{\circ} \dots 90^{\circ}$ (найінтенсивніші лінії дисульфиду молібдену MoS_2 , сульфїду міді Cu_2S , міді Cu , інтерметалїдів $Cu_{31}Sn_8$, Cu_3Sn_5 , Cu_3P). Крім цього, записували лінію (311) α -твердого розчину олова у міді в інтервалі кутів $2\theta = 122^{\circ} \dots 124^{\circ}$.

Результати дослідження та їх обговорення. На рис. 1 показана структура вихідного СКАМ $Cu-Sn-P-MoS_2$ і вторинних змащувальних плївок, сформованих на його поверхні при терті у вакуумі. На рис. 2 і у табл. 1 приведені результати рентгенофазового аналізу вихідного СКАМ та вторинних змащувальних плївок, синтезованих на його поверхні тертям у вакуумі $2 \cdot 10^{-5}$ мм. р. с. при тисках 2,5 і 5 МПа за швидкості 1 м/с.



Рис. 1. Структура вихідного СКАМ $Cu-Sn-P-MoS_2$ (а) і вторинних змащувальних плївок, сформованих на його поверхні при терті у вакуумі (в структурі вони сірого кольору) за швидкості ковзання 1 м/с при тисках 2,5 МПа (а) і 5 МПа (б); $\times 300$

Структура СКАМ $Cu-Sn-P-MoS_2$, сформована у процесі його синтезу, мікрогетерогенна і представляє собою (табл. 1) гомогенний α -твердий розчин олова у міді, зміцнений фосфїдом молібдену MoP , в якому рівномірно розподілений конгломерат на основі сульфїду міді Cu_2S з добавками дисульфїду молібдену MoS_2 .

Структурний і фазовий аналізи вторинних змащувальних плївок, сформованих при роботі пари тертя вал (контртіло із сталі ШХ15) — вкладиш (зразок із СКАМ) у вакуумі, показали, що вони мають так само, як і вихідний матеріал, мікрогетерогенну структуру, але в порівнянні з ним змінені фазовий і хімічний склад, структурний стан та деякі мікромеханічні характеристики (рис. 1 і табл. 1).

У вторинних змащувальних плївках у порівнянні з вихідним матеріалом із зростанням величини прикладеного тиску незначно (з 69,5 до 66,7 %) зменшується кількість α -твердого розчину олова у міді і мало (на 0,3 %) збільшується кількість зміцнювальної фази MoP , а процентний вміст конгломерату, який виконує у матеріалі вторинної змащувальної плївки роль твердого мастила, збільшується з 20,6 до 23,1 % (табл. 1).

У конгломераті твердого мастила (Cu_2S з добавками MoS_2), котрий входить до складу змащувальної плївки, із збільшенням тиску при сталій швидкості ковзання змінюється співвідношення між кількістю MoS_2 і Cu_2S в бік збільшення в ньому вмісту сульфїду міді.

Так, у конгломераті твердого мастила, що входить до складу вторинної змащувальної плївки, синтезованій у вакуумі при швидкості 1 м/с та тиску 2,5 МПа, кількість дисульфїду молібдену зменшилась з 35 до 12 %, а кількість сульфїду міді навпаки збільшилась з 65 до 88 %; вміст конгломерату твердого мастила збільшився до 21,8 %, кількість зміцнювальної фази практично не змінилась, а α -твердого розчину олова зменшилась з 69,5 до 68,3 % у порівнянні з їх кількістю у вихідному матеріалі.

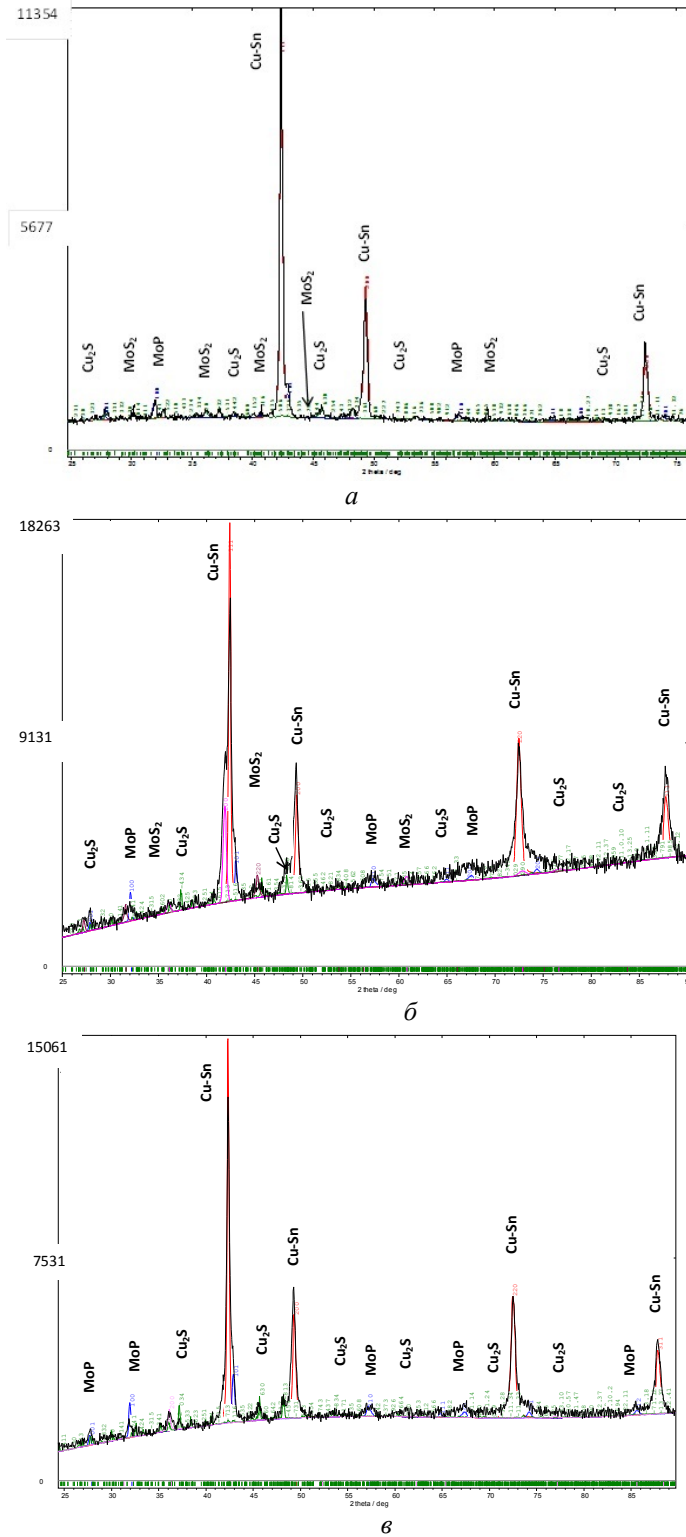


Рис. 2. Рентгенограми СКМ Cu-Sn-P-MoS_2 (*a*) і вторинних змащувальних плівок, сформованих на його поверхні при терті у вакуумі у парі зі сталлю ШХ15 за швидкості ковзання 1 м/с і при тисках 2,5 МПа (*б*) та 5 МПа (*в*)

Таблиця 1

Результати рентгенофазового аналізу матеріалу СКАМ Cu–Sn–P–MoS₂ і сформованих на його поверхні вторинних змащувальних плівок при терті у вакуумі

Об'єкт дослідження	Фази і їх кількість, %			
	α -твердий розчин Cu–Sn	MoP	Cu ₂ S_M	MoS ₂
Вихідний СКАМ ІПМ-306	69,5	9,9	13,2	7,2
	матриця структури СКАМ ІПМ		тверде мастило 20,6 (Cu ₂ S+MoS ₂)	
Фазовий склад СКАМ ІПМ-306	69,5 (Cu–Sn)+9,9MoP+20,6(13,2Cu ₂ S+7,2 MoS ₂) У конгломераті твердого мастила (13,2Cu ₂ S+7,2MoS ₂) 35 % складає дисульфід молібдену, а 65 %—сульфід міді			
Вторинні змащувальні плівки, сформовані при $V = 1$ м/с і $P = 2,5$ МПа				
	68,3	9,9	19,2	2,6
	матриця структури вторинних плівок		тверде мастило 21,8(Cu ₂ S+MoS ₂)	
Фазовий склад вторинних плівок	68,3 (Cu–Sn)+9,9MoP+21,8(19,2Cu ₂ S+2,6 MoS ₂) У конгломераті твердого мастила (19,2Cu ₂ S+2,6 MoS ₂) 12 % складає дисульфід молібдену, а 88 %—сульфід міді			
Вторинні змащувальні плівки, сформовані при $V = 1$ м/с і $P = 5$ МПа				
	66,7	10,2	23,1	0
	матриця структури вторинних плівок		тверде мастило 23,1 Cu ₂ S	
Фазовий склад вторинних плівок	66,7(Cu–Sn)+10,2MoP+23,1Cu ₂ S У конгломераті твердого мастила (Cu ₂ S+MoS ₂) дисульфід молібдену відсутній, а сульфід міді складає 100 %			

Отже, проведеними дослідженнями встановлено, що вторинні змащувальні плівки, синтезовані в процесі тертя робочої пари у вакуумі $2 \cdot 10^{-5}$ мм. рт. с. за тисків 2,5 і 5 МПа та швидкості ковзання 1 м/с, як і сам вихідний матеріал, мають мікрогетерогенну структуру. Несуча структурна складова вторинних змащувальних плівок представляє собою гомогенний α -твердий розчин олова у міді, зміцнений фосфідом молібдену, а конгломерат сполук (Cu₂S+MoS₂) виконує роль твердого мастила. Слід зазначити, що із збільшенням тиску на пару тертя при сталій швидкості ковзання вміст дисульфиду молібдену у конгломераті твердого мастила зменшується, а вже при $P = 5$ МПа його кількість прямує до нуля. У складі матриці плівки незначно збільшується кількість зміцнювальної фази (MoP), а кількість α -твердого розчину олова у міді незначно зменшується.

Мікромеханічні властивості вихідного матеріалу і вторинних змащувальних плівок, котрі сформувалися на його поверхні під час тертя у вакуумі при тиску 5 МПа і швид-

кості ковзання 1 м/с (твердість H_{IT} , показник нормованої твердості H/E^* , відносна деформація ϵ_{es} викликана прикладеною із зовні напругою, максимальна напруга при пружній деформації σ_{es} , показник схильності матеріалу до релаксації C_{IT}), приведені у табл. 2.

Таблиця 2

Мікромеханічні характеристики матеріалу СКАМ Cu–Sn–P–MoS₂ і вторинних змащувальних плівок, синтезованих тертям у вакуумі $2 \cdot 10^{-5}$ мм. рт.с. при швидкості ковзання 1 м/с і тиску 5 МПа

№ п/п	Фазовий склад вихідного матеріалу (1) і вторинних змащувальних плівок (2), %	H_{IT} , ГПа	H/E^*	ϵ_{es} , %	σ_{es} , ГПа	C_{IT}
1.	69,5 (Cu–Sn)+9,9MoP+20,6(13,2Cu ₂ S+7,2 MoS ₂)	1,74	0,024	0,75	0,534	1,7
2.	66,7(Cu–Sn) + 10,2MoP+23,1Cu ₂ S	1,74	0,048	1,47	0,534	1,65

Із табл. 2 витікає, що величина таких мікромеханічних характеристик вторинних змащувальних плівок, як відносна деформація ϵ_{es} і показник нормованої твердості H/E^* збільшились у два рази в порівнянні з цими показниками для вихідного матеріалу. Ці результати служать підтвердженням ефекту зміцнення матеріалу вторинних змащувальних плівок (поверхневого шару тертя) під дією прикладеного тиску при його роботі насухо у вакуумі. Зміцнення матеріалу плівок приводить до збільшення зносостійкості СКАМ, до зменшення його зносу ($I < 5$ мкм/км). Причинами покращення названих механічних характеристик вторинних плівок можуть бути декілька факторів, у тому числі їх хімічний і фазовий склад, а також структурний стан, зміне-ні під дією навантаження тертям (табл. 1).

По-перше, фазовий склад вихідного матеріалу відрізняється від фазового складу матеріалу вторинних змащувальних плівок. У вихідній структурі матеріалу СКАМ Cu–Sn–P–MoS₂ вміст конгломерату, який виконує роль твердого мастила і представляє собою суміш двох сполук (13,2Cu₂S+7,2MoS₂), складає 20,6 %. У вторинних змащувальних плівках, сформованих при швидкості ковзання 1 м/с за тиску 5 МПа, вміст конгломерату збільшився з 20, 6 до 23,1 % і представляє собою один сульфід міді Cu₂S (табл. 2). Тобто, тверде мастило, яке міститься у матеріалі поверхневого шару (синтезований вторинний плівці) відрізняється від вихідного матеріалу не тільки кількістю, але і складом. По-друге, співставленням отриманих значень H/E^* для вихідного матеріалу і вторинних змащувальних плівок можна зробити висновок: складові структури вихідного матеріалу являються крупнозернистими, оскільки H/E^* для них дорівнює 0,024. Складові структури вторинних змащувальних плівок знаходяться у дрібнокристалічному стані, оскільки співвідношення H/E^* для них складає $\approx 0,05$. Розмір елементів структури вторинних змащувальних плівок, синтезованих у вакуумі при тиску 5 МПа за швидкості ковзання 1 м/с, згідно роботам [8–9], близький до 100 нм. Тобто поверхневі шари матеріалу під час тертя у вакуумі піддані високим степеням деформації і дрібняться.

Таким чином, синтез вторинних змащувальних плівок на поверхні матеріалу при його терті у вакуумі $2 \cdot 10^{-5}$ мм. рт. с. за швидкості ковзання 1 м/с під дією тиску 5 МПа та формування їх мікрогетерогенної структури, збільшення кількості твердого мастила (антифрикційної структурної складової) у плівках і зміна його складу у їх структурі, дрібнокристалічний стан структурних складових вторин-

них плівок і забезпечують матеріалу СКAM Cu–Sn–P–MoS₂ за приведених умов тертя низький коефіцієнт тертя (0,05).

Зростання у два рази таких мікромеханічних властивостей вторинних змащувальних плівок, як відносна деформація ϵ_{es} , викликана прикладеною з зовні напругою, і показника нормованої твердості H/E^* та перехід структурних складових змащувальних плівок у дрібнокристалічний стан служать підтвердженням зміцнення матеріалу поверхневого шару і збільшення зносостійкості матеріалу СКAM Cu–Sn–P–MoS₂ при терті у вакуумі.

Із табл. 2 витікає, що твердість вторинних змащувальних плівок не змінилася у порівнянні з твердістю вихідного матеріалу, так само як не змінилися максимальна напруга при пружній деформації σ_{es} і показник схильності матеріалу до релаксації C_{IT} . Ідентичність вторинних змащувальних плівок з вихідним матеріалом по вказаним мікромеханічним характеристикам очевидно пов'язана з несуттєвою відмінністю по фазовому складі несучої структурної складової їх мікрогетерогенної структури (табл. 1).

Таким чином, працездатність матеріалу СКAM Cu–Sn–P–MoS₂ у вакуумі обумовлена особливостями його структурної побудови і функціональною адаптацією до умов експлуатації завдяки трибосинтезу на робочій поверхні шару матеріалу нової структури, відмінного по хімічному і фазовому складу, структурному стані та механічним властивостям від основного вихідного матеріалу.

Висновки:

1. Вторинні змащувальні плівки, синтезовані в процесі тертя робочої пари у вакуумі $2 \cdot 10^{-5}$ мм. рт. ст. за тисків 2,5 і 5 МПа та швидкості ковзання 1 м/с, як і сам вихідний матеріал, мають мікрогетерогенну структуру. Несуча структурна складова вторинних змащувальних плівок представляє собою гомогенний α -твердий розчин олова у міді, зміцнений фосфідом молібдену, а конгломерат сполук (Cu₂S+MoS₂) виконує роль твердого мастила.

2. Із збільшенням тиску на пару тертя при сталій швидкості ковзання вміст дисульфідну молібдену у конгломераті твердого мастила зменшується, а вже при $P = 5$ МПа його кількість прямує до нуля. У складі матриці плівки незначно збільшується кількість зміцнювальної фази (MoP), а кількість α -твердого розчину олова у міді незначно зменшується.

3. Відносна деформація ϵ_{es} і показник нормованої твердості H/E^* при тиску 5 МПа і швидкості ковзання 1 м/с збільшились у два рази в порівнянні з цими показниками для вихідного матеріалу.

4. Складові структури вихідного матеріалу являються крупнозернистими, оскільки H/E^* для них рівно 0,024. Складові структури вторинних змащувальних плівок знаходяться у дрібнокристалічному стані, оскільки співвідношення H/E^* для них складає $\approx 0,05$. Розмір елементів структури вторинних змащувальних плівок, синтезованих у вакуумі при тиску 5 МПа за швидкості ковзання 1 м/с ≈ 100 нм. Поверхневі шари матеріалу під час тертя у вакуумі піддані високим степеням деформації і дрібняться.

5. Зростання у два рази таких мікромеханічних властивостей вторинних змащувальних плівок, як відносна деформація ϵ_{es} і показника нормованої твердості H/E^* та перехід структурних складових змащувальних плівок у дрібнокристалічний стан служать підтвердженням зміцнення матеріалу поверхневого шару і збільшення зносостійкості матеріалу СКAM Cu–Sn–P–MoS₂ ($I < 5$ мкм/км) при терті у вакуумі.

6. Причинами покращення названих механічних характеристик вторинних плівок можуть бути декілька факторів, у тому числі їх хімічний і фазовий склад, а також структурний стан, змінені під дією навантаження тертям.

Список літератури

1. 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. Фущич, Т. М. Чевычелова, А. Д. Костенко // Порошковая металлургия. – 2006. – № 3/4. – С. 14–21.

2. Косторнов А. Г. Закономерности трения, износа и целенаправленного синтеза поверхностей трения композиционных самосмазывающихся материалов / А. Г. Косторнов, О. И. Фущич, Т. М. Чевычелова, Ю. М. Симеонова, А. Д. Костенко // Порошковая металлургия. – 2007. – № 3/4. – С. 11–19.

3. Косторнов А. Г. Визначальний вплив трибосинтезу нових структур у зоні тертя на експлуатаційні властивості антифрикційних матеріалів / А. Г. Косторнов, Ю. М. Симеонова, О. І. Фущич, Т. М. Чевичелова, О. Д. Костенко // Проблеми тертя та зношування: Наук.–техн. збірник. К.: НАУ. – 2007. – Вип. 46. – С. 109–121.

4. Косторнов А. Г. Связь триботехнических свойств самосмазывающегося композиционного антифрикционного материала на основе меди с упругопластическими характеристиками зоны трибосинтеза / А. Г. Косторнов, О. И. Фущич, В. Ф. Горбань, Т. М. Чевычелова, А. Д. Костенко // Порошковая металлургия. – 2008. – № 11/12. – С. 63–70.

5. Косторнов А. Г. Структурные и фазовые превращения в зоне трибосинтеза самосмазывающегося композиционного материала на основе меди / А. Г. Косторнов,

О. И. Фущич, Т. М. Чевычелова, А. Ю. Коваль, А. Д. Костенко // Порошковая металлургия. – 2009. – № 5/6. – С. 139–146.

6. Косторнов А. Г. Связь эксплуатационных свойств композиционного материала Cu–Sn–CuWO₄–MoS₂ с микромеханическими характеристиками поверхности трения / А. Г. Косторнов, О. И. Фущич, В. Ф. Горбань, Т. М. Чевычелова, М. В. Карпец, А. Ю. Коваль // Порошковая металлургия. – 2010. – № 11/12. – С. 38–47.

7. Патент 90073, Україна. Самозмащувальний композиційний антифрикційний матеріал на основі міді для роботи у вакуумі / А. Г. Косторнов, О. І. Фущич, Т. М. Чевичелова (ІПМ НАН України), Ю. М. Симеонова, П. С. Гецов (ІКД БАН). – Публ. 25. 03. 2010. – Бюл. № 6.

8. Горбань В. Ф. Свойства вторичных структур металлов и покрытий / Горбань В. Ф. // Металлофиз. новейшие технологии. – 2007. – Т. 25. – № 11. – С. 1527–1535.

9. Фирстов С. М. Уравнение индентирования / С. А. Фирстов, В. Ф. Горбань, Э. П. Печковский, Н. А. Мамека // Доповіді академії наук України. – 2007. – № 12. – С. 100–106.

10. Косторнов А. Г. Антифрикційні порошкові матеріали на основі міді для високих швидкостей обертання / А. Г. Косторнов, О. І. Фущич, Т. М. Чевичелова, О. Д. Костенко // Проблеми тертя та зношування: Наук. – техн. збірник. К.: НАУ. – 2006. – Вип. 45. – С. 84–96.

11. Карапетьянц М. Х. Общая и неорганическая химия / М. Х. Карапетьянц. – М.: Химия, 1981. – 632 с.

12. Крагельский И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.

13. Костецкий Б. И. Трение, смазка и износ в машинах / Б. И. Костецкий. – К.: Техніка, 1970. – 396 с.

14. Федорченко И. М. Композиционные спеченные антифрикционные материалы / И. М. Федорченко, Л. И. Пугина. – К.: Наук. думка, 1980. – 440 с.

A. G. KOSTORNOV, O. I. FUSHCHYCH, T. M. CHEVYCHELOVA, M. V. KARPETS,
O. D. KOSTENKO

INFLUENCE OF THE TRIBOSYNTHESIS OF NEW STRUCTURES IN THE FRICTION ZONE ON THE OPERATING PROPERTIES OF A SELF-LUBRICATING COMPOSITE MATERIAL BASED ON COPPER

We have investigated the synthesis of secondary structures on the friction surface of a Cu–Sn–P–MoS₂ self-lubricating composite material based on copper during operation in a vacuum of $2 \cdot 10^{-5}$ Hg mm in pair with ShKh15 steel under a pressure of 2.5 and 5.0 MPa at a sliding velocity of 1 m/s.

Secondary lubricating films synthesized in the process of friction, like the initial material, have a microheterogeneous structure. Their matrix is homogeneous α -solid solution of tin in copper hardened by molybdenum phosphide, and a conglomerate of compounds (Cu₂S+MoS₂) plays the role of a solid lubricant.

In contrast to the components of the initial material, the structural components of the secondary lubricating films are in the fine-crystalline state because the ratio H/E^* for them is ~ 0.05 . The size of structural elements is ~ 100 nm. Their relative strain ϵ_{es} and index of normalized hardness H/E^* increased twice as compared with those for the initial material. Several factors, including the chemical composition, phase composition, and structural state of the secondary films, which changed in friction under load, can be causes of the improvement of the indicated mechanical characteristics of these films.

The increase in the aforementioned micromechanical characteristics and the transition of the structural components of the lubricating films into the fine-crystalline state confirm the hardening of the surface layer of the Cu–Sn–P–MoS₂ self-lubricating composite material and the enhancement of its wear resistance ($I < 5$ $\mu\text{m}/\text{km}$) during friction in vacuum.

Thus, the serviceability of the Cu–Sn–P–MoS₂ self-lubricating composite material in vacuum is due to the characteristic features of its structure formation and functional adaptation to the operating conditions owing to the fact that, on the working surfaces, the tribosynthesis of secondary films, namely, a layer of a material having a new structure and differing in chemical and phase composition, structural state, and mechanical properties from the main initial material, occurs.

Keywords: self-lubricating composite material, microheterogeneous structure, matrix, solid lubricant, phase, sintering, structural state, micromechanical properties.

Косторнов Анатолій Григорович – академік НАН України, доктор технічних наук, професор, завідувач відділу триботехнічних і проникних матеріалів Інституту проблем матеріалознавства НАН України, email: OtdsKostormov@ipms.kiev.ua.

Фушич Ольга Іванівна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник ІПМ НАН України, email: OtdsKostormov@ipms.kiev.ua.

Чевичелова Тетяна Михайлівна – науковий співробітник ІПМ НАН України, email: OtdsKostormov@ipms.kiev.ua.

Карпець Мирослав Васильович – доктор фізмат наук, провідний науковий співробітник ІПМ НАН України.

Костенко Олексій Дмитрович – науковий співробітник ІПМ НАН України.