

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.1(98).17360

М. В. КИНДРАЧУК, В. В. ХАРЧЕНКО, І. А. ГУМЕНЮК, Д. В. ЛЕУСЕНКО

*Національний авіаційний університет, Україна***ВПЛИВ ЛЕГУВАННЯ МЕТАЛЕВОЇ МАТРИЦІ НА АНТИФРИКЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕВТЕКТИЧНИХ ПОКРИТТІВ**

*Проведено аналіз існуючих антифрикційних матеріалів, що використовуються у вузлах тертя газоперекачувального агрегату в якості вкладишів підшипників. З урахуванням недоліків, у роботі запропоновано новий матеріал, який буде дешевшим та матиме кращі експлуатаційні властивості. Розглянуто особливості впливу легування металевої матриці на процеси формування триботехнічних властивостей сплавів та покриттів на основі заліза з тугоплавкими карбідами і боридами. Оцінено перспективу їх використання для підшипників ковзання замість бабітів.*

**Ключові слова:** газоперекачувальний агрегат, підшипник ковзання, вкладиш підшипника, бабіт, антифрикційний евтектичний сплав, легування.

**Вступ.** Одним з основних вузлів тертя газоперекачувального агрегату (ГПА) стаціонарного типу є підшипник ковзання, вкладиші якого згідно з технічними умовами мають бабітове покриття зі сторони поверхні тертя. Бабіт, як антифрикційний матеріал, використовуються для забезпечення мінімального зношення поверхонь трибологічної пари «вал-вкладиш» в умовах граничного тертя, що виникає при запусках агрегату, а також при нерозрахункових режимах його роботи. За антифрикційними властивостями бабіти перевершують усі інші сплави, але одночасно поступаються їм щодо опірності втомі та забезпеченні необхідної несучої здатності при підвищених температурах (більше 100–120 °С). Нині для заливання вкладишів підшипників використовуються високоякісні олов'яні бабіти марки Б-83 або Б-88, що є досить дефіцитними та дорогими матеріалами з жорсткими вимогами до їх хімічного складу. Тому виникає необхідність пошуку нових матеріалів, що за своїми антифрикційними характеристиками не будуть поступатися бабітам, але і одночасно будуть дешевшими та матимуть високу опірність втомі і здатність працювати при підвищених температурах. До таких матеріалів можуть бути віднесені зносостійкі антифрикційні сплави, де в якості матриці буде використовуватися бронза, а зміцнюючою фазою будуть виступати вклюдження евтектичного матеріалу на основі заліза, або евтектичні сплави, металева матриця яких легована компонентами бронзи.

**Аналіз існуючих досліджень.** Як показали проведені раніше дослідження, евтектичні сплави мають високу зносостійкість при терті без машення, проте достатньо високий коефіцієнт тертя [1]. Перспективним шляхом покращення антифрикційних властивостей сплавів може бути легування їх металевої матриці. У литих евтектичних сплавах на основі перехідних металів з тугоплавкими фазами втілення, унаслідок малої взаємної розчинності, практично, поєднуються вихідні властивості фаз, що утворюють її [2]. Фази втілення мають високу температуру плавлення, твердість, міцність, пружність, хімічну та термодинамічну стійкість і зносостійкість. Поєднання фаз втілення з менш твердою, але більш пластичною металевою матрицею додає таким евтектикам унікальні властивості. Так, сплави на основі заліза з тугоплавкими карбідами і боридами в литому стані (табл. 1, 2) мають високу зносостійкість у поєднанні з високою корозійною стійкістю, міцністю, технологічністю. Вони не містять дефіцитних або дорогих компонентів. Ці властивості відкривають широкі можливості для використання зазначених евтектик у вузлах тертя машин і механізмів.

Таблиця 1

## Хімічний склад евтектичних сплавів

Марка сплаву	Хімічний склад, мас. %									
	Cr	Ni	Ti	V	Al	Cu	B	C	Mn	Fe
ВТН	15,0	7,7	3,2	7,9	5,6	–	1,4	1,9	–	56,8
ХТН	20	8,0	2,5	–	5,6	–	2,6	–	–	61,3
ХВС	13,0	–	–	12,0	–	1,0	–	2,9	–	71,1

Таблиця 2

## Фазовий склад евтектичних сплавів

Фазовий склад		Кількість фаз в евтектиці, мас. %
Матриця	Зміцнююча фаза	
12X18H9T	TiB <sub>2</sub> +VC	TiB <sub>2</sub> -4,6; VC-9,8
12X18H9T	TiB <sub>2</sub> + CrB <sub>2</sub>	TiB <sub>2</sub> -4,4; CrB <sub>2</sub> -7,5
30X13	VC	VC-17,0

У розглянутих евтектичних сплавах у литому стані фази втілення утворюють зміцнюючий каркас, що несе основне навантаження при навантаженні. Металева матриця (твердий розчин на основі заліза) виконує функцію передачі і перерозподілу напружень між окремими гілками несучого каркасу з фаз втілення. Оскільки взаємна розчинність фаз у цих сплавах обмежена, з'являється можливість окремого легування залізної матриці металами, що можуть додавати їй необхідні властивості. Наприклад, легування хромом підвищує корозійну стійкість твердого розчину на основі заліза, а легування нікелем призводить до стабілізації  $\gamma$ -заліза, що зберігає високі пластичні і міцнісні характеристики. На цьому принципі засноване легування широко розповсюджених нержавіючих сталей аустенітного класу типу 18–8 (18 відсотків хрому і 8 відсотків нікелю). Металева матриця розглянутих евтектик легована за тим же принципом, тобто має досить високу корозійну стійкість і високу пластичність, характерні для сталей типу 18–8.

Завдяки вище перерахованим особливостям евтектичні сплави на основі заліза з тугоплавкими карбідами і боридами поєднують у собі властивості легованого твердого розчину на основі  $\gamma$ -заліза і високі міцнісні та триботехнічні властивості фаз втілення.

Це дуже важлива якість, оскільки, у даний час відома досить обмежена кількість евтектичних металевих систем (на основі свинцю), триботехнічними властивостями яких можна керувати шляхом легування металевої основи [3]. Недоліком таких систем є низька міцність, що не дозволяє використовувати їх у вузлах тертя з високими контактними навантаженнями. Оскільки досліджувані евтектичні покриття в якості основи містять тверді розчини на основі заліза, зміцнені тугоплавкими фазами втілення, контактні навантаження в цих покриттях можуть бути істотно вищі. Це дозволяє використовувати передбачувані евтектичні покриття для вирішення більш широкого кола задач триботехніки.

**Мета роботи** – дослідження впливу комплексного легування на триботехнічні властивості евтектичного сплаву ВТН. В якості матеріалу постачальника легуючих елементів при сплавленні з евтектичним сплавом вибрана бронза Бр.ОЦС5-5-5, яка широко використовується в підшипниках тертя ковзання і має відносно низький коефіцієнт тертя, рівний 0,25. Згідно з літературними даними, такі елементи позитивно впливають на фізико – механічні властивості матеріалів. Відомо [4], що легування міддю знижує мікрокрихкість боридних покриттів. Встановлено, що підвищення пластичності покриттів в цьому випадку обумовлено, як наявністю міді в боридах, так і присутністю в шарі м'якої евтектичної фази, яка

слугує зоною релаксації напружень [5]. В роботі [6] відзначається, що олово в мідних сплавах суттєво полегшує, при заданих умовах тертя, утворення вторинних структур, скорочуючи тим самим тривалість стану припрацювання, знижуючи коефіцієнт тертя системи і забезпечуючи перехід до стаціонарного режиму з постійним коефіцієнтом тертя.

**Методика досліджень.** Введення компонентів бронзи в евтектичні сплави на основі заліза з тугоплавкими фазами втілення приведе до зниження коефіцієнта тертя, оскільки, як показано в роботі [7], метали IV-A групи, введені в сплави такого типу, знаходяться в твердому розчині. Дійсно, результати локального рентгеноспектрального аналізу показали, що введені в евтектичний сплав системи 12X18H9T-TiB<sub>2</sub>-VC компоненти бронзи знаходяться в металевій матриці.

Для отримання таких сплавів змішувалися порошки евтектичного сплаву з порошком бронзи в різних співвідношеннях. Отримані суміші разом з порошком прожареної бури, у співвідношенні 1 частина бури до 4 частин суміші, засипалися у внутрішню порожнину втулки, яка з торців закривалась графітовими кришками.

Покриття наносили центробіжним способом на модернізованому токарному верстаті. Нагріту в електропечі до 1473-1573 К втулку встановлювали в центра (рис. 1) і обертали з певною кутовою швидкістю  $\omega$ . Після зниження температури зовнішньої поверхні до 873-973 К, за якої закінчується процес кристалізації, втулку знімали з верстату і охолоджували на повітрі. Температура плавлення суміші становила  $\approx$  1373-1473 К. В деяких випадках з метою зменшення температурних напружень, що викликають утворення внутрішніх тріщин, втулки повільно охолоджували в сухому піску або в печі.

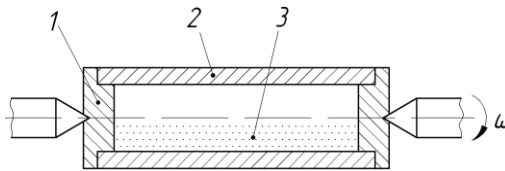


Рис. 1. Схема нанесення евтектичного покриття на внутрішню поверхню циліндричних деталей: 1 – ущільнювальний фланець, 2 – втулка, 3 – порошкова суміш

В структурі отриманих сплавів спостерігаються евтектичні кристали дибориду титану і монокарбиду ванадію і незначна кількість первинних кристалів металеві фази (рис. 2, а). Співвідношення між цими фазами змінюється в залежності від вмісту бронзи. Зі збільшенням кількості бронзи сплав стає доевтектичним (рис. 2, б).

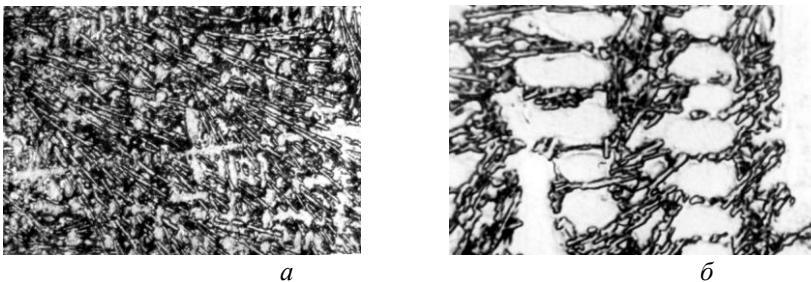


Рис. 2. Мікроструктура легованого евтектичного сплаву: евтектичного складу (а), доевтектичного складу (б),  $\times 500$

**Отримані результати.** Результати триботехнічних випробувань легованих сплавів наведені в таблиці 3.

Додавання вже 10 % бронзи більш ніж у 2 рази знижує знос евтектичного сплаву, а мінімальний знос має сплав з 30 % бронзи. Це співвідношення є оптимальним, оскільки сумарний знос контртіла (сталь 45, HRC42) і легованого сплаву припадає на сплав із 30 % бронзи.

Таблиця 3

**Зносостійкість евтектичних сплавів при терті без мащення ( $P = 1$  МПа,  $V = 0,1$  м/с)**

Сплави	273 К		373 К	
	Знос, мг/см <sup>2</sup> за 10 <sup>3</sup> м	Коефіцієнт тертя	Знос, мг/см <sup>2</sup> за 10 <sup>3</sup> м	Коефіцієнт тертя
ВТН	39,0	0,76	36,1	0,6
ВТН + 30 % Cu	19,2	0,45	17,5	0,42
ВТН + 25% Cu + 6%Sn + 4%Pb	8,3	0,28	8,0	0,25
Б83	5,1	0,15	9,2	0,14

Таким чином, легування евтектичних сплавів, створюючи позитивний градієнт механічних властивостей в покритті, знижує коефіцієнт тертя, локалізує процеси тертя в тонких поверхневих шарах вторинних структур. Локальним рентгеноспектральним аналізом поверхонь тертя встановлено, що вторинні структури містять поряд із залізом та легуючими елементами до 24 % кисню. Рентгеноструктурним аналізом поверхонь тертя зразків не виявлено утворення мартенситу деформації, що узгоджується з даними роботи [8] про те, що мідь суттєво знижує схильність аустеніту до зміцнення та стабілізує його по відношенню до мартенситуутворення.

Необхідно відзначити, що введення елементів бронзи в сплав евтектичного складу знижує в ньому об'ємний вміст зміцнюючої фази. Разом з тим, зносостійкість легованого сплаву підвищується. Так, при введенні в сплав біля 30 % об. бронзи, вміст зміцнюючої фази (TiB<sub>2</sub>, VC) знижується з 21 % об. до 12 % об. Проте, ця кількість зміцнюючої фази знаходиться в межах критичного об'ємного вмісту армуючої фази  $V_{crit}$ , забезпечуючого ефективне зміцнення матриці композиту. Для міді  $V_{crit}$ , при однаковій зміцнюючій фазі, приблизно в два рази менша, ніж для сталі типу 18/8.

Крім того, високу зносостійкість легованого сплаву можна пояснити і підвищенням напружень початку пластичної течії матриці з пониженням коефіцієнта тертя [9-10].

Звертає на себе увагу і той факт, що знос сплавів з великим вмістом бронзи значно перевищує величину зносу сталі 12X18H9T. Літературні дані і отримані результати підтверджують, що мідь знижує схильність аустеніту до утворення мартенситу деформації. Можливо це одна з причин зменшення зносостійкості легованого сплаву, що пов'язана з пониженням енергоємності структури [11], обмеженням можливих механізмів дисипації енергії, зміною здатності до внутрішнього тертя.

**Висновки.** Проведені дослідження дозволили розробити зносостійкий антифрикційний евтектичний сплав на основі заліза для наплавки, додатково легований оловом і свинцем. Склад сплаву вибраний таким чином, що залізо, хром і нікель утворюють металеву матрицю, в якій рівномірно розподілені зміцнюючі кристали дибориду титану і монокарбиду ванадію. Олово і свинець, розчинившись в металевій матриці, підсилюють ефект міді щодо зниження коефіцієнта тертя, що призводить до суттєвого зростання зносостійкості в умовах тертя без мащення.

Розроблений сплав за своїми триботехнічними властивостями дещо поступається бабіту Б83 за кімнатних температур і перевищує при підвищених температурах (табл. 3).

Тому перспективним є проведення подальших досліджень з параметрами навантаження, наближеними до експлуатаційних при роботі підшипників ковзання газоперекачувального агрегату.

#### Список літератури

1. Кіндрачук М.В. Формування зносостійких евтектичних покриттів концентрованими джерелами енергії / М.В. Кіндрачук, О.І. Дудка, В.С. Черненко. – К.: ІСДОУ, 1997. – 121с.
2. Шурін А.К. Деякі загальні закономірності потрійних діаграм стану металів з бором / А.К. Шурін, В.Е. Панарін // Металофізика. – К.: Наук. думка, 1976. – № 66. – С.85-92.
3. Косторнов А.Г. Вплив складу порошкового підшипникового сплаву на основі міді на його службові характеристики / А.Г. Косторнов, О.І. Фушич // Порошкова металургія. – №3,4. 2005. – С.120-126.
4. Похмурський В.И. Повышение долговечности деталей машин с помощью диффузионных покрытий / В.И. Похмурський, В.В. Далисов, В.М. Голубец. – К.: Наук. думка, 1980. –188с.
5. Лоскутов В.Ф. Упрочнение деталей машин боромеднением / В.Ф. Лоскутов, О.В. Семенченко, Е.М. Гриненко // Защитные покрытия на металлах. – К. : Наук. думка, 1991. – Вып. 25. – С. 80– 82.
6. Шурін А.К. Износостойкие наплавки эвтектическими сплавами на основе железа /А.К. Шурін, В.Е. Панарін, М.В. Кіндрачук // Защитные покрытия на металлах. – К.: Наук. думка, 1991. – Вып. 17. – С. 40–43.
7. Тихонович В.И. Исследование строения и износостойкости сплавов на основе стали Х18Н9Т с диборидом титана / В.И. Тихонович, В.А. Локтионов, В.Е. Панарін и др. // Проблемы трения и изнашивания. – К: Техніка. – 1974. - №5. – С. 82-85.
8. Гаврилюк В.П. Трибологія литих сплавів / В.П. Гаврилюк, Є.А. Марковський, В.І. Тихонович. – К.: 2007. – 428 с.
9. Кіндрачук М. В. Підвищення зносостійкості плазмових евтектичних покриттів термоциклованням лазером/ В. В. Харченко, О. В. Тісов, І.А. Гуменюк, Н. М. Стебелецька, А. О. Юрчук, Л. А. Гловин // Проблеми тертя та зношування.- 2020.- №4. С. 78 – 85.
10. Кіндрачук М.В. Аналітичні залежності ефективної межі текучості композиційних покриттів, навантажених силами тертя / М.В. Кіндрачук, М.С. Яхья, О.В. Тісов // Проблеми тертя та зношування: наук. – техн. зб. – К.: НАУ, 2007. – Вып. 47 – С.19-26.
11. Кіндрачук М. В. Зовнішньосиловий вплив на закономірності припрацювання антифрикційних систем /В.В. Харченко І. А. Гуменюк, Н.О. Науменко, М. А. Гловин, І. В. Костецький // Проблеми тертя та зношування.- 2021.- №4 (93). С. 70 – 76.

Стаття надійшла до редакції 22.02.2023.

**Кіндрачук Мирослав Васильович** – докт. техн. наук, професор, професор кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: nau12@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-0529-2466>.

**Харченко Володимир Володимирович** – завідувач лабораторії кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Національного авіаційного університету, проспект Любомира Гузара,1, м. Київ, Україна, 03058, +38(044)4067773, E-mail: nau12@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6383-5337>

**Гуменюк Ігор Анатолійович** – докторант, Національний авіаційний університет, <https://orcid.org/0000-0002-4352-7035>

**Леусенко Дар'я Володимирівна** – аспірантка кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національного авіаційного університету, м. Київ, Україна, nau12@ukr.net.

*M. V. KINDRACHUK, V.V. KHARCHENKO, I.A. HUMENIUK, D. V. LEUSENKO*

### **INFLUENCE OF ALLOYING THE METAL MATRIX ON THE ANTI-FRICTION PROPERTIES OF EUTECTIC COATINGS**

An analysis of the existing anti-friction materials used in the friction units of the gas pumping unit as bearing liners was carried out. Taking into account the shortcomings, a new material is proposed in the work, which will be cheaper and have better operational properties. It was considered the characteristics of effect of alloying of metallic die on the processes of generation of tribotechnical characteristics of alloys and coatings on the basis of iron with refractory carbides and borides. It was resulted the technology of alloying of die of eutectic alloys as VTN by the components of bronze Sn-Zn-Pb 5-5-5. It was designed a wearproof antifriction eutectic alloy on the basis of iron for the welding of surfaces of bearing shells, presented it's tribotechnical characteristics and estimated the perspective of using the alloy for shells of sleeve bearings of gas turbine units in place of babbitts.

**Key words:** gas turbine unit, sleeve bearing, bearing shell, babbitt, antifriction eutectic alloy, alloying.

#### **Referenses**

1. Kindrachuk M.V. Formuvannia znosostiikykh evtektichnykh pokryttiv kontsentrovanykh dzherelamy enerhii / M.V. Kindrachuk, O.I. Dudka, V.S. Chernenko. – K.: ISDOU, 1997. – 121s.
2. Shuryan A.K. Deiaki zahalni zakonmirnosti potriinykh diahram stanu metaliv z borom / A.K. Shuryan, V.E. Panarin //Metalofizyka. – K.: Nauk. dumka, 1976. – № 66. – S.85-92.
3. Kostornov A.H. Vplyv skladu poroshkovoho pidshypnykovoho splavu na osnovi midi na yoho sluzhbovi kharakterystyky / A.H. Kostornov, O.I. Fushych // Poroshkova metalurhiia. – №3,4. 2005. – S.120-126.
4. Pokhmurskii V.I. Povishenie dolgovechnosti detalei mashin s pomoshchyu diffuzionnykh pokritii / V.I. Pokhmurskii, V.V. Dalisov, V.M. Golubets. – K.: Nauk. dumka, 1980. –188s.
5. Loskutov V.F. Uprochnenie detalei mashin boromedneniem / V.F. Loskutov, O.V. Semenchenko, Ye.M. Grinenko // Zashchitnie pokritiya na metallakh. – K. : Nauk. dumka, 1991. – Vip. 25. – S. 80– 82.
6. Shurin A.K. Iznosostoikie naplavki evtekticheskimi splavami na osnove zheleza /A.K. Shurin, V.E. Panarin, M.V. Kindrachuk // Zashchitnie pokritiya na metallakh. – K.: Nauk. dumka, 1991. – Vip. 17. – S. 40–43.
7. Tikhonovich V.I. Issledovanie stroeniya i iznosostoikosti splavov na osnove stali Kh18N9T s diboridom titana / V.I. Tikhonovich, V.A. Loktionov, V.E. Panarin i dr. // Problemi treniya i iznashivaniya. – K: Tekhnika. – 1974. - №5. – S. 82-85.
8. Havryliuk V.P. Trybolohiia lytykh splaviv / V.P. Havryliuk, Ye.A. Markovskiy, V.I. Tykhonovych. – K.: 2007. – 428 s.
9. Kindrachuk M. V. Pidvyshchennia znosostiikosti plazmovykh evtektichnykh pokryttiv termotsykliuvanniam lazerom/ V. V. Kharchenko, O. V. Tisov, I.A. Humeniuk, N. M. Stebeletska, A. O. Yurchuk, L. A. Hlovyn // Problemy tertia ta znoshuvannia. - 2020.- №4. S. 78 – 85.
10. Kindrachuk M.V. Analitichni zalezhnosti efektyvnoi mezhi tekuchosti kompozytsiinykh pokryttiv, navantazhenykh sylamy tertia / M.V. Kindrachuk, M.S. Yakhia, O.V. Tisov // Problemy tertia ta znoshuvannia: nauk. – tekhn. zb. – K.: NAU, 2007. – Vyp. 47 – S.19-26.
11. Kindrachuk M. V. Zovnishnosylovyi vplyv na zakonmirnosti prypratsiuvannia antyfryktsiinykh system /V.V. Kharchenko I. A. Humeniuk, N.O. Naumenko, M. A. Hlovyn, I. V. Kostetskyi // Problemy tertia ta znoshuvannia.- 2021.- №4 (93). S. 70 – 76.

---

**Kindrachuk Myroslav** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: nau12@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-0529-2466>.

**Kharchenko Volodymyr** - head of laboratory of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: nau12@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6383-5337>

**Humeniuk Ihor** - doctoral student, , National Aviation University, <https://orcid.org/0000-0002-4352-7035>

**Leusenko Dar`ia** - PhD student, Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University.