

<sup>1</sup>М. В. Кіндрачук, д-р техн. наук, проф.,  
<sup>2</sup>О. В. Радіоненко, канд. техн. наук, доц.,  
<sup>1</sup>Д. М. Перро, студ.,  
<sup>1</sup>В. В. Подлесний, студ.

## ТРИБОТЕХНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕВТЕКТИЧНИХ СПЛАВІВ У МЕТАСТАБІЛЬНИХ СТАНАХ

<sup>1</sup>Національний авіаційний університет, Kindrachuk@ukr.net

<sup>2</sup>Приазовський державний технічний університет

*Розглянуто особливості впливу метастабільних станів на процеси формування триботехнічних властивостей евтектичних покриттів на основі заліза з тугоплавкими карбідами та боридами. Показано, що шляхом зміни ступеня нерівноважності термодинамічного стану, шляхом відпалу, можна керувати їх триботехнічними і корозійними властивостями.*

**Стан проблеми.** Практично усі сплави, що використовуються в техніці - сталі, чавуни, сплави на основі алюмінію, титана, міді, хрому, молібдену, вольфраму і т.д., знаходяться в метастабільному стані. Властивості цих сплавів, обумовлені різноманітням метастабільних фаз і структур, мають можливість щодо керування ними шляхом зсуву системи від положення термодинамічно рівноважного до нерівноважних станів [1–4]. З появою джерел високої концентрації енергії (лазерна обробка, газотермічні методи напилювання, електронний промінь, високо частотне індукційне нагрівання і т.д.) можливості керування метастабільними фазами і структурами сплавів істотно розширилися [5–8], у порівнянні з традиційними методами обробки (об'ємне гартування, відпал, відпуск, старіння). Використання таких джерел дозволило реалізувати швидкісний температурний вплив у локальних об'ємах, що відкрило нові можливості поєднання різного ступеня метастабільних станів і створення композицій незвичайних структурно-фазових складів.

Аналіз результатів сучасних термічних і комбінованих методів обробки існуючих сталей і сплавів показує, що чим більше різноманіття в них метастабільних станів, тим вище можливості керування їхнім поведінням, тобто властивостями [9].

Любий евтектичний сплав, так як і сталі, може знаходитися в різних нерівноважних станах. Ці стани виявляються у виді нерівноважної структури або появи метастабільних фаз, що має місце при створенні екстремальних умов кристалізації з рідкого стану, наприклад, за великих швидкостей охолодження [10]. Зі зміною швидкості охолодження відбувається зміна механізму евтектичної кристалізації з утворенням трьох типів структур: грубого конгломерату фаз, структур кооперативного росту, тонкого конгломерату фаз [11]. Кожна з перерахованих структур відповідає різному ступеню відхилення від положення термодинамічної рівноваги і контролюється швидкістю роздільної дифузії атомів перед фронтом кристалізації. Найбільш рівноважна структура грубого конгломерату фаз (малі швидкості охолодження), найбільш нерівноважна структура – тонкого конгломерату фаз (максимальні швидкості охолодження). У широкому діапазоні швидкостей охолодження між ними формуються колоніальні структури, обумовлені кооперативним ростом фаз, що складають евтектику. У залежності від ступеня відхилення від термодинамічної рівноваги, ці структури мають різну стабільність – найбільш стабільна структура грубого конгломерату фаз.

За швидкого охолодження з рідкого стану в евтектичних сплавах можлива поява метастабільних фаз. В якості таких фаз виступають хімічні сполуки, що існують на відповідній діаграмі фазових рівноваг, але в іншій температурно-концентраційній області (метастабільні фази I роду), або, сполуки, що не існують на цій діаграмі (метастабільні фази II роду).

Таким чином, змінюючи швидкість охолодження евтектик, з'являється можливість керувати їхніми властивостями: механічними, фізичними, хімічними, експлуатаційними. Це, наприклад, широко використовується на практиці при підборі оптимального поєднання властивостей евтектоїдних сталей і чавунів [8–10].

**Результати досліджень.** У литих евтектичних сплавах на основі перехідних металів з тугоплавкими фазами проникнення, унаслідок малої взаємної розчинності, практично, поєднуються вихідні властивості фаз, що утворюють її [9; 10]. Фази проникнення мають високу температуру плавлення, твердість, міцність, пружність, хімічну та термодинамічну стійкість і зносостійкість. Поєднання фаз

проникнення з менш твердою, але більш пластичною металевою матрицею додає таким евтектикам унікальні властивості. Так, сплави на основі заліза з тугоплавкими карбідами і борідами в литому стані (табл. 1, 2) мають високу зносостійкість у поєднанні з високою корозійною стійкістю, міцністю, технологічністю [11]. 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 проникнення утворюють зміцнюючий каркас, що несе основне навантаження при навантаженні. Металева матриця (твердий розчин на основі заліза) виконує функцію передачі і перерозподілу напруг між окремими гілками несучого каркасу з фаз проникнення. 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 проникнення. Використання триботехнічних матеріалів у литому стані має обмежене застосування, оскільки при терті працюють поверхневі і приповерхні шари, тому в даній роботі поставлена мета: шляхом керування різним ступенем метастабільності станів у евтектичних покриттях на основі заліза, зміцнених тугоплавкими карбідами і боридами, здійснити регулювання їхніх триботехнічних властивостей.

Покриття із зазначених вище евтектик, одержували КІБ (конденсація, стимульована іонним бомбардуванням) і газотермічними методами. Переважне використання мікрокраплинної складової продуктів дугового розпилення литого катода в методі КІБ дозволяє зберегти його фазовий склад в покритті. Таким чином, можна чекати в одержуваних покриттях високих триботехнічних і корозійних властивостей, властивих евтектичним сплавам у литому виді.

Необхідно відзначити, що особливістю обраних технологій, є велика швидкість нагрівання евтектичного сплаву, малий час існування розплаву (частки секунди) і наступне швидке охолодження на порівняно холодній підкладці. Ці особливості призводять до появи нерівноважних станів, що виявляються у виді зміни механізму евтектичної кристалізації. Замість колоніальних структур, властивих литому станові, утворюються структури тонкого конгломерату фаз (рис. 1), і з'являється велика кількість метастабільних фаз (табл. 3, 4).

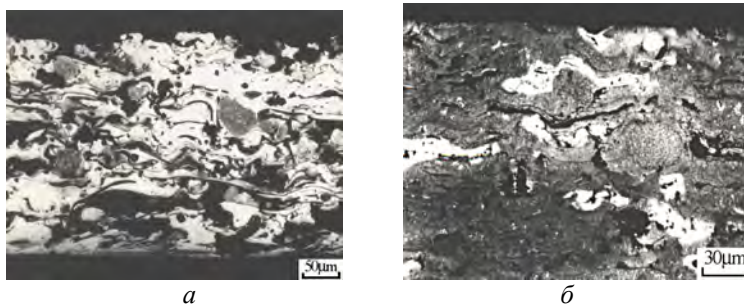


Рис. 1. Структура детонаційного евтектичного покриття ВТН: *а* – вихідний (напилений) стан з великою кількістю областей тонкого конгломерату фаз («білі шари»); *б* – відпал покриття при  $T = 0,75 T_{пл}$ ,  $\tau = 0,5$  годин

Таблиця 3

## Фазовий склад евтектичних покриттів

Евтектика	Фазовий склад		
	Вихідний	Відпал 0,75 T <sub>пл</sub>	
		0,5 год	5 год
ВТН	$\alpha' + \gamma' + \gamma + VC + TiC + VC' + CrB_2$	$\gamma' + VC + CrB_2 + \gamma + TiC'$	$\gamma' + \gamma + VC + VC'$
ХВС	$\alpha + \gamma' + \gamma + VC' + Cr_{23}C_6 + Cr_3C_2$	$\alpha + \gamma' + VC' + Cr_3C_2 + Cr_{23}C_6$	$\alpha + \gamma' + VC' + Cr_{23}C_6$
ХТН	$\alpha' + \gamma + TiC'$	$\alpha' + \gamma' + TiC'$	$\alpha' + \gamma' + TiC' + CrB_2 + TiB_2$

Таблиця 4

## Фазовий склад евтектичних покриттів ВТН за різних температур відпалу

№ з/п	Температура відпалу, К	Фазовий склад	
		Матриця	Зміцнююча фаза
1	Вихідний	$\alpha$	TiC
2	448	$\alpha$	TiC
3	488	$\alpha$	TiC
4	533	$\alpha$	$V_2C + VC$
5	603	$\gamma$	$V_2C + VC$
6	633	$\gamma$	$TiB_2 + Fe_3V_3C$
7	748	$\gamma$	$TiB_2 + Fe_3V_3C$
8	803	$\gamma$	$TiB_2 + Fe_3V_3C + \theta$
9	953	$\gamma$	$TiB_2 + Fe_3V_3C + Fe_{23}(C,B)_6 + Fe_3C$
10	1023	$\gamma$	$TiB_2 + Fe_3V_3C + Fe_{23}(C,B)_6 + Fe_3C$

Рентгеноструктурний фазовий аналіз показує, що в досліджуваних евтектичних покриттях поряд з рівноважними фазами, що існують на діаграмі фазових рівноваг, утворюються нерівноважні фази I і II роду (див. табл. 3).

Склад і кількість метастабільних фаз визначають триботехнічні і корозійні властивості досліджуваних покриттів. Співвідношенням між рівноважними і нерівноважними фазами (див. табл. 3, 4), а також структурою і, отже, властивостями отриманих евтектичних покриттів можна керувати шляхом відпалу.

На рис. 2 наведені мікроставовості складових вихідних (напилених) і відпалених евтектичних газотермічних покриттів. Високотемпературний дифузійний відпал при  $(0,75 T_{пл})$  приводить як до зміни фазового складу покриттів, так і до зміни їхньої структури (див. табл. 3, рис. 1, б). Крім того, відпал змінює хімічну активність структурних складових евтектичних покриттів (збільшення травимості, у порівнянні з вихідним, напиленим станом) і високотемпературну окислюваність.

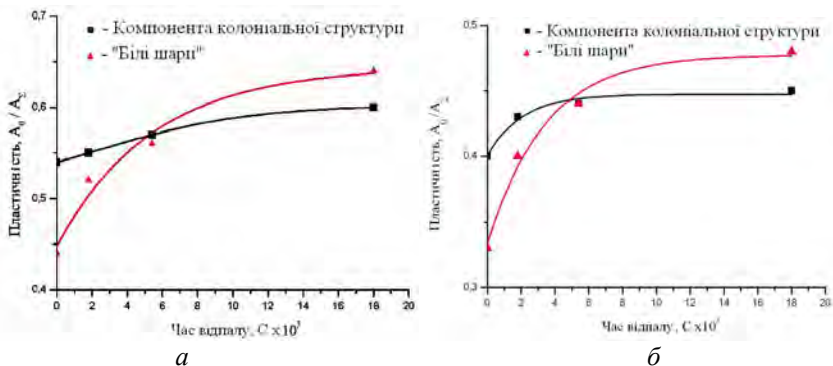


Рис. 2. Зміна мікроставовостей структурних складових газотермічних евтектичних покриттів ВТН (а – детонаційне) і (б – плазмове) у залежності від часу відпалу за температурою  $0,75T_{пл}$

Утворення окисних плівок за високих температур на повітрі відіграє важливу роль у триботехнічних властивостях, особливо при терті ковзання без мастила. Окисні плівки, що утворюються при терті, їхній склад, структура, товщина, адгезія відіграють роль твердого мастила, змінюють триботехнічні характеристики. Окисні плівки здатні ефективно знижувати знос не тільки покриття, але і пари тертя в цілому. Таким чином, змінюючи ступінь нерівноважного стану досліджуваних евтектичних покриттів можна керувати триботехнічними властивостями пари тертя. Це дуже важлива якість, оскільки, у даний час відома досить обмежена кількість ев-

тектичних металевих систем (на основі свинцю), триботехнічними властивостями яких можна керувати шляхом зміни ступеня метастабільного стану [12]. 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 проникнення, контактні навантаження в цих покриттях можуть бути істотно вищі. Це дозволяє використовувати передбачувані евтектичні покриття для вирішення більш широкого кола задач триботехніки.

Змащення в парі тертя з евтектичними покриттями дещо згладжує процеси, що відбуваються при сухому терті ковзання, сприяючи при цьому реалізації принципів самоорганізації структури тертьових матеріалів.

**Висновки.** Таким чином, газотермічні і КІБ евтектичні покриття на основі заліза з тугоплавкими карбідами і борідами мають нерівноважну структуру і містять метастабільні фази, що визначають їх триботехнічні властивості при сухому терті ковзання. Ці ж принципи можна використовувати в умовах наявності мастила між тертьовими поверхнями.

Шляхом зміни ступеня нерівноважності термодинамічного стану вивчених евтектичних покриттів (відпал) можна керувати їх триботехнічними і корозійними властивостями.

Застосування вивчених евтектичних покриттів дозволяє розширити коло триботехнічних задач, пов'язаних зі зменшенням сумарного зносу пари тертя в умовах граничного тертя.

#### Список літератури

1. *Филиппов М. А.* Стали с метастабильным аустенитом / М. А. Филиппов, В. С. Литвинов, Ю. Р. Немировский – М.: Металлургия, 1988. – 256с.

2. *Рыбакова Л. М.* Структура и износостойкость металла / Л. М. Рыбакова, Л. И. Куксенова. – М.: Металлургия, 1982. – 212с.

3. *Григорьянц А. Г.* Основы лазерного термоупрочнения сплавов / А. Г. Григорьянц, А. Н. Сафонов. – М.: Высшая школа, 1988. – 159с.

4. *Кіндрачук М. В.* Формування зносостійких евтектичних покриттів концентрованими джерелами енергії / М. В. Кіндрачук, О. І. Дудка, В. С. Черненко. – К.: ІСДОУ, 1997. – 121с.

5. *Чейлях А. П.* Экономно легированные метастабильные сплавы и упрочняющие технологии / А. П. Чейлях. – Харьков: Национальный научный центр Харьковский физико-технический институт, 2003. – 212с.

6. *Таран Ю. Н.* Структура евтектичных сплавов / Ю. Н. Таран, В. Н. Мазур. – М.: Металлургия, 1978. – 311с.

7. *Войнов Б. А.* Износостойкие сплавы и покрытия / Б. А. Войнов – М.: Машиностроение, 1980. – 120с.

8. *Любарский И. М.* Металлофизика трения. (Сер.: Успехи современного металловедения) / И. М. Любарский, Л. С. Палатник. – М.: Металлургия, 1976. – 176с.

9. *Шурин А. К.* Жаропрочные эвтектические сплавы / А. К. Шурин. // Жаропрочность и жаростойкость металлических материалов – М.: Наука, 1976. – С. 64-70.

10. *Шурин А. К.* Некоторые общие закономерности тройных диаграмм состояний металлов с бором / А. К. Шурин, В. Е. Панарин // Металлофизика. – К.: Наук. думка, 1976.– №66.– С.85-92.

11. *Шурин А. К.* Износостойкость нержавеющей евтектичных сплавов с фазами внедрения / А. К. Шурин, В. Е. Панарин, М. В. Киндрачук // Проблемы трения и изнашивания. – К.: Техника, 1981. – №19. – С.17-28.

12. *Косторнов А. Г.* Вплив складу порошкового підшипникового сплаву на основі міді та його службові характеристики / А. Г. Косторнов, О. І. Фушич // Порошковая металлургия. – № 3,4. – 2005. – С. 120–126.

*Киндрачук М. В., Радионенко А. В., Перро Д. М., Подлесный В. В.* **Триботехнические свойства эвтектических покрытий в метастабильных состояниях** // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2012. – Вип. 58. – С.75–82.

Рассмотрены особенности влияния метастабильных состояний на процессы формирования триботехнических свойств эвтектических покрытий на основе железа с тугоплавкими карбидами и боридами. Показано, что путём изменения степени неравновесности термодинамического состояния, путём отжига, можно управлять их триботехническими и коррозионными свойствами.

Рис. 2, табл. 4, список лит.: 18 наим.

*Kindrachuk M. V., Radionenko O. V., Perro D. M., Podlesnii V. V.* **Tribotechnical properties of eutectic coatings in metastable states**

The influence of the metastable states on the form processes of tribotechnical properties eutectic coatings on the iron base containing refractory carbides and borides are considered. It is shown that by a change the degree of non equilibrium of the thermodynamics state by annealing it is possible to manage their wear resistance and corrosion resistance.

**Ключові слова:** евтектичні покриття, відпал, зносостійкість.

Стаття надійшла до редакції 18.10.2012