

*М.В. Кіндрачук, М.А. Гловин, І.В. Костецький,  
(Національний авіаційний університет, Україна)*

*Н.М. Стебелецька,  
(ВП НУБіПУ «Бережанський агротехнічний інститут», Україна)*

### **Керування триботехнічними властивостями евтектичних покриттів ступенем їхнього невірноваженого стану**

*Розглянуто вплив нерівноважних станів на процеси формування триботехнічних властивостей евтектичних покриттів, основою яких є залізо з тугоплавкими карбідами та боридами. Показано, що співвідношенням між цими фазами, а також структурою і, отже, триботехнічними і корозійними властивостями отриманих евтектичних покриттів можна керувати шляхом відпаду.*

Більшість сплавів використовуваних в техніці - сплави на основі заліза, алюмінію, титану, міді, хрому, молібдену, вольфраму і т.д., знаходяться в метастабільному стані, а отже існує можливість керування їхніми властивостями, шляхом зсуву системи від положення термодинамічно рівноважного до нерівноважних станів.

Ці стани виявляються у вигляді нерівноважної структури або появи метастабільних фаз, що мають місце в екстремальних умовах при кристалізації з рідкого стану, наприклад, за великих швидкостей охолодження.

При швидкій зміні охолодження евтектика, з'являється можливість керувати їхніми властивостями: механічними, фізичними, хімічними, експлуатаційними. Це, наприклад, широко використовується на практиці при підборі оптимального поєднання властивостей евтектичних сталей і чавунів.

У литих евтектичних сплавах, основою яких є перехідні метали, фази проникнення мають високу температуру плавлення, твердість, пружність, міцність, термодинамічну та хімічну стійкість і зносостійкість, оскільки мають малу взаємну розчинність. Поєднання такої фази з менш твердою, але більш пластичною металевою основою (матрицею) сприяє появі унікальних властивостей. Таким чином, сплави, основою яких є залізо з тугоплавкими карбідами і боридами в литому стані (табл. 1, 2), не містять дефіцитних або дорогих компонентів і володіють такими характеристиками як: висока зносостійкість та висока корозійна стійкість, міцність, технологічність, що забезпечує їх можливість для використання розглядуваних евтектиків у вузлах тертя різних машин і механізмів.

У досліджуваних сплавах у литому стані основне навантаження іде на зміцнюючий каркас, що утворюють фази проникнення. Металева основа (твердий розчин на основі заліза) виконує функцію перерозподілу напруг і передачі з фаз проникнення між окремими гілками несучого каркасу. Так як у цих сплавах взаємна розчинність фаз обмежена, виникає можливість окремого легування залізної матриці (основи) металами, що додаватимуть їй потрібні властивості. Прикладом є легування хромом, що підвищує корозійну стійкість

металевої матриці, а зберігає міцнісні й високі пластичні характеристики легування нікелем за рахунок стабілізації  $\gamma$ -заліза.

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		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

Враховуючи вище перераховані особливості, евтектичні сплави поєднують у собі властивості легованого твердого розчину на основі  $\gamma$ -заліза і високі міцнісні та триботехнічні властивості фаз проникнення.

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. Отже, в отриманих евтектичних покриттях можна очікувати високих корозійних і триботехнічних властивостей, притаманних у литому виді сплавам.

Особливістю обраних технологій є велика швидкість нагрівання сплаву, малий час (частки секунди) існування розплаву і наступне швидке охолодження на порівняно холодній підкладці, що призводять до появи метастабільних станів, що виявляються у вигляді зміни процесу евтектичної кристалізації. Утворюються структури тонкого конгломерату фаз (рис. 1) замість колоніальних структур, які властиві литому стану, і з'являється велика кількість метастабільних фаз (табл. 3, 4).

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

Корозійні і триботехнічні властивості досліджуваних покриттів визначаються за кількістю і складом метастабільних фаз. Зміною температури відпалу є можливість бачити співвідношення між рівноважними і нерівноважними фазами (табл. 3, 4), а також структурою і властивостями евтектичних покриттів.

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	$\alpha' + \gamma + TiC'$	$\alpha' + \gamma' + TiC'$	$\alpha' + \gamma' + TiC' + CrB_2 + TiB_2$

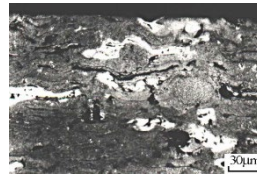
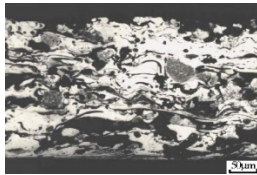


Рис. 1. Структура детонаційного евтектичного покриття ВТН: *a* – вихідний (напилений) стан з великою кількістю областей тонкого конгломерату фаз («білі шари»); *б* – відпал покриття при  $T = 0,75 T_{пл}$ ,  $\tau = 0,5$  годин

Таблиця 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	$\gamma$	$TiB_2 + Fe_3V_3C + Fe_{23}(C,B)_6 + Fe_3C$

На рис. 2 наведені мікрвластивості складових вихідних (напилених) і відпалених евтектичних газотермічних покриттів. Високотемпературний дифузійний відпал при  $(0,75 T_{пл})$  змінює фазовий склад покриття та структуру (див. рис. 1, б), а також приводить до зміни хімічної активності структурних складових евтектичних покриттів (підвищення травимості, у порівнянні з вихідним, напиленим станом) і високотемпературну окиснюваність).

Триботехнічні властивості змінюються внаслідок утворення при терті окисних плівок, які відіграють роль твердого мастила. Вони ефективно знижують знос не тільки покриття, але і пари тертя в цілому.

Це дуже важлива якість, тому що на даний час тільки в обмеженій кількості металевих евтектичних систем (на основі свинцю) можна керувати триботехнічними властивостями шляхом зміни ступеня метастабільного стану. Недолік таких систем - низька міцність, що не дозволяє використовувати їх у вузлах тертя з високими контактними навантаженнями.

За рахунок тугоплавких фаз проникнення, які зміцнюють тверді розчини на основі заліза, контактні навантаження в цих покриттях можуть бути набагато вищі, що дозволяє такі евтектичні покриття використовувати для широкого кола задач триботехніки.

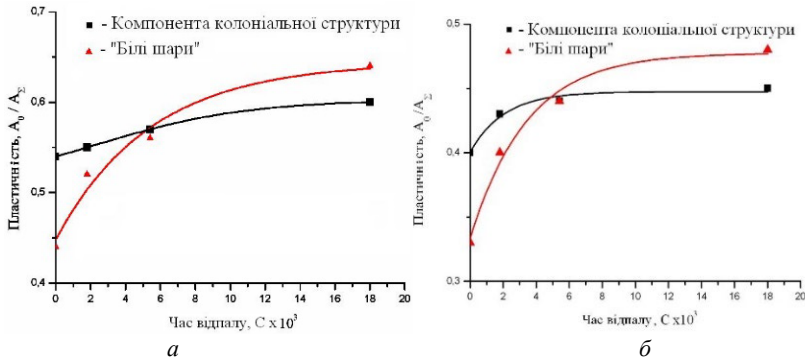


Рис. 2. Зміна мікрвластивостей структурних складових газотермічних евтектичних покриттів ВТН (а – детонаційне) і (б – плазмове) у залежності від часу відпалу за температури  $0,75T_{пл}$

### Висновки.

Таким чином, газотермічні і КІБ евтектичні покриття, основою яких є залізо з тугоплавкими карбідами і боридами 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.

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

Застосовуючи вивчені евтектичні покриття можна розширити коло триботехнічних задач, пов'язаних зі зменшенням сумарного зносу пари тертя в умовах граничного тертя.

### Список літератури

1. Л.С. Малинов, И.Е. Малышева (2001) Получение в структуре сталей и чугунов метастабильного аустенита с целью повышения абразивной и ударно-абразивной износостойкости. Вісник ПДТУ: зб. 208 наук. праць. – Маріуполь: ПДТУ, № 11. 96-100. – Сер.: Технічні науки.
2. А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов (2021) Основы лазерного термоупрочнения сплавов. Директ-Медиа, 158.
3. М.В. Кіндрачук, О.І. Дудка, В.С. Черненко(1997) Формування зносостійких евтектичних покриттів концентрованими джерелами енергії. К.: ІСДОУ, 121.
4. А.П.Чейлях (2003) Экономно легированные метастабильные сплавы и упрочняющие технологии. Харьков: Национальный научный центр Харьковский физико-технический институт, 212.
5. М.В. Кіндрачук, В.В. Харченко, О.В. Тісов, І.А. Гуменюк, Н.М. Стебелецька, А.О. Юрчук, А.Л. Гловин (2021) Підвищення зносостійкості плазмових евтектичних покриттів термоциклюванням лазером. Проблеми тертя та зношування, 1 (90), 78–85.
6. Е.И. Марукович, М.И. Карпенко (2005) Износостойкие сплавы. М.: Машиностроение, 428 с.
7. Л.Ю. Ионова (2017) Области формування повністю та обмежено метастабільних та подвійних евтектик, що невідображуються у метастабільних діаграмах. Металознавство та обробка металів, № 2. 33 – 37.
8. М.М. Ямшинський, Г.Є. Федоров, К.С. Радченко (2015) Прогнозування ливарних і механічних властивостей жаростійких сталей. Металл и литье Украины, №10 (269) 16-22.
9. М. С. Ковальченко, П. И. Лобода (2008) Бор, карбид бора, бориды и материалы на их основе. Неорган. материаловедение. Материалы и технологии. К. Т. 2, кн. 1.
10. М.В. Кіндрачук, О.В. Тісов, Н.М. Стебелецька (2014) Розробка градієнтних покриттів для накладок гальмівних пристроїв. Технологічний аудит та резерви виробництва. Харків, 3/2 (17), 7-16.