

УДК 621.762

СТРУКТУРИ ТА ТРИБОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРИБОТЕХНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ TiFe-xC, ОТРИМАНИХ САМОПОШИРЮВАНИМ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИМ СИНТЕЗОМ

О. О. ОНИЦУК, В. Д. РУДЬ

Луцький національний технічний університет

Досліджено трибологічні властивості та структури матеріалів системи TiFe-xC, отриманих самопоширюваним високотемпературним синтезом. Виявлено, що ці триботехнічні матеріали (ТМ) добре працюють в умовах абразивного і сухого тертя за помірних навантажень та кімнатної температури. Структура отриманих матеріалів складається з інтерметалідів Ti₂Fe, TiFe, які є термодинамічно стабільними фазами з великим теплоутворенням. Додавання бору до системи TiFe-xC суттєво знижує температуру основних критичних точок сполук, розширює діапазон температур синтезу. Встановлено коефіцієнти тертя для пар тертя кулька сталь ШХ15-TiFe-20C і кулька сталь ШХ15-сталь 45, які за однакових умов становлять 0,11 і 0,15, відповідно. Високі міцнісні показники зразків ТМ TiFe-20C; TiFe-30C; 55Ti-20C-30Fe-0,31В дають можливість використовувати ці матеріали для захисту поверхонь ступок сопел реактивних двигунів, що працюють за високих температур і навантажень.

Ключові слова: *триботехнічні матеріали, система TiFe-xC, сталь ШХ15, зносотривкість, коефіцієнт тертя, сухе тертя, абразивне тертя, самопоширюваний високотемпературний синтез.*

На сьогодні ступки сопла реактивних двигунів захищають, наносячи на поверхню твердий гальванічний хром, який має високу твердість та корозійну тривалість у водних середовищах. Водночас таке гальванічне хромування небезпечне для навколишнього середовища.

Одним з найдешевших, найпродуктивніших, ресурсо- та енергозберігаючих способів отримання матеріалів конструктивного і триботехнічного призначення є самопоширюваний високотемпературний синтез (СВС). Раніше дослідили [1–3] характер властивостей матеріалів залежно від способу їх одержання. Отримані матеріали застосовують у різних зносотривких частинах машин, покриттях, що працюють в умовах підвищених температур, тисків і навантажень. СВС інтерметалідів досліджувався в багатьох працях (Комаров, 1993; Авакаян, 1994; Бовене і Дербі, 1997). Він має низькі енергозатрати, коротку тривалість синтезу та потребує простого устаткування. Проте структура і трибологічні властивості інтерметалідів, отриманих СВС недостатньо вивчені [4, 5].

Мета роботи – дослідити трибологічні характеристики матеріалів системи TiFe-xC в парі з контртілом зі сталі ШХ15 в умовах сухого тертя, а також абразивного зношування.

Методика і матеріали. За вихідні матеріали взяли порошки титану, заліза і вуглецю з чистотою >99,5 mass.%. Розмір вихідних порошків вуглецю становить 1...5 μm, титану 25...30 μm, заліза – від 10 до 50 μm. Всі складники композиційних матеріалів попередньо очищували розчином ацетону або спирту для видалення з поверхні частинок інших хімічних сполук і підвищення їх адгезії. Формували де-

кілька сумішей систем TiFe-xC з вмістом вуглецю 0; 10; 20; 30 та 40 mass.% і 55Ti-20C-30Fe-nB з вмістом бору 0,31 та 0,5 mass.% (табл. 1).

Таблиця 1. Хімічний склад шихти зразка триботехнічного матеріалу

Система	Вміст елементів, mass.%			
	Ti	C	Fe	B
Ti-C-Fe	50	0	50	–
	45	10	45	–
	40	20	40	–
	37,5	30	37,5	–
	30	40	30	–
Ti-C-Fe-B	55	20	30	0,31
	55	20	30	0,5

Змішували порошки вихідних компонентів в кульовому млині об'ємом 2 dm³ впродовж 8 h. Далі кожну зі сумішей пресували під тиском 150 МПа і поміщали в реактор для СВС. Максимальна температура процесу 3000...3200 К. Отримані зразки охолоджували на повітрі. Контролювали температуру горіння вольфрамнієвими термопарами (діаметр спаю 100 μm) [5, 6]. Замірювали в околі зони контакту (на відстані 5 mm від неї).

Мікроструктурні дослідження і елементний аналіз виконували на сканівному електронному мікроскопі LEO 1450 CARI. Рентгеноструктурний і фазовий аналізи порошоків, спресованих і спечених зразків здійснювали на рентгенівському дифрактометрі “ДРОН-3” [7].

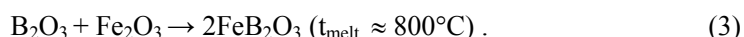
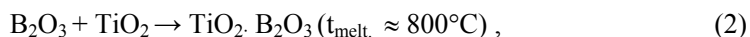
Досліджували зношування триботехнічних матеріалів (ТМ) на установці для випробування матеріалів тертям у вакуумі за кімнатної температури, яка створена на базі серійної машини ИМАШ-20-75 (АЛА-ТОО) [8, 9]. При цьому використали схему реверсивного тертя, яка дала змогу дослідити руйнування матеріалу під час навантаження за схемою кулька–площина без мащення. Трибологічну поведінку досліджували за сухого тертя на повітрі, швидкості ковзання індентора 1,6 mm/s, навантажень 2,5 kN та в парі з контртілом (кулька сталь ШХ15). Тривалість випробування – 3500 s.

Абразивне зношування виконували, використовуючи жорстко закріплений абразивний диск з електрокорунду середньом'якої твердості СМ-2 на керамічній зв'язці 7К15 діаметром 150 та шириною 8 mm [10].

Результати дослідження. Структура триботехнічних матеріалів. Металографічні дослідження отриманих матеріалів показали, що матричною фазою для всіх зразків ТМ системи TiFe-10C, TiFe-20C, 55Ti-20C-30Fe-0,31B є феритна структура на основі заліза (рис. 1b, c) із включеннями інтерметалідів Ti₂Fe, TiFe, що є термодинамічно стабільними фазами з великим теплоутворенням. На рис. 1a видно сірі ділянки (інтерметалід – результат реакції), чорні (пори), світло-сірі (непрореаговані в результаті реакції частинки титану), темно-сірі (непрореаговані в результаті реакції частинки заліза). Додавання вуглецю змінює структуру інтерметаліду TiFe – суттєво зростає кількість карбіду титану поряд із інтерметалідами титану, при цьому дещо знижується вміст кисню в спеченому матеріалі, однак пористість отриманого зразка ТМ зростає.

Додавання бору до системи TiFe-xC зменшує температуру спікання шихти за рахунок утворення легкоплавкої евтектики. Крім цього, додавання бору під час

СВС зумовлює виникнення борного ангідриду B_2O_3 . З оксидами заліза і титану B_2O_3 утворює борати титану $TiO_2 \cdot B_2O_3$ і борати заліза FeB_2O_3 за температури $\sim 800^\circ C$ [3, 6, 7]. Борати титану $TiO_2 \cdot B_2O_3$ та заліза FeB_2O_3 мають хороші розкислювальні та захисні властивості і тривало захищають триботехнічний матеріал від окислення [3]. Плівки боратів на межах зерен утворюються за такими етапами:



Це сприяє швидшому та повному проходженню СВС шихти. Крім цього, формується дрібнозернистіша структура ТМ з середнім розміром зерна $3 \dots 5 \mu m$ (рис. 1с). Така структура зумовлює особливу трибологічну поведінку ТМ як за сухого, так і за абразивного тертя.

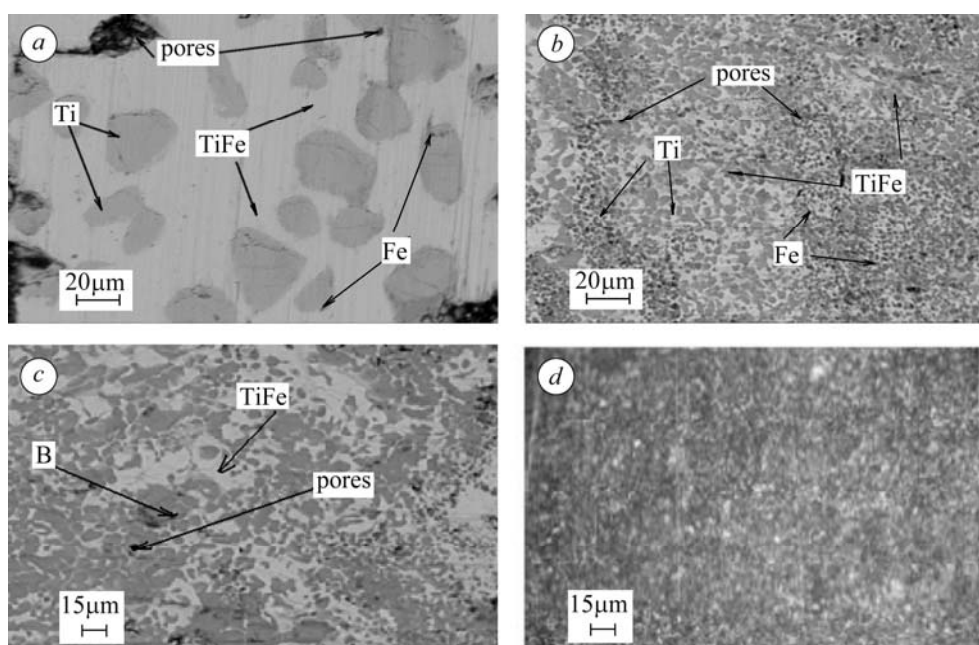


Рис. 1. Типова структура зразка триботехнічного матеріалу після СВС:
a –TiFe; *b* – TiFe–20C; *c* – 55Ti–20C–30Fe–0,31B; *d* – сталь 45. $\times 500$.

Fig. 1. Characteristic microstructure of tribotechnical material (TM) sample
 after self-propagating high-temperature synthesis:
a –TiFe; *b* – TiFe–20C; *c* – 55Ti–20C–30Fe–0.31B; *d* – steel 45. $\times 500$.

Мікротвердість та абразивна зносотривкість ТМ системи TiFe–xС. Встановлено, що на мікротвердість та зносотривкість отриманих зразків суттєво впливає вміст вуглецю та бору в системі TiFe–xС. Так, у ТМ з вмістом вуглецю 10 mass.% та зі збільшенням бору від 0,31 до 0,5 mass.% мікротвердість зростає від HV 850 до 855. Для матеріалу з вмістом вуглецю 40 mass.% – від HV 775 до 778 за такого ж збільшення бору (рис. 2а). Це пояснюється виникненням мікротріщин у зразку під час його шліфування. З підвищенням вуглецю у системі TiFe–xС від 0 до 40 mass.% твердість знижується від HV 870 до 800 (рис. 2а), внаслідок появи значної кількості залишкового аустеніту.

В результаті зниження мікротвердості в зразках ТМ зі зростанням вуглецю від 0 до 40 mass.% їх абразивна зносотривкість зменшується майже в 1,1 рази

(рис. 2). Аналогічно, для системи TiFe-xC-B зі збільшенням бору в ТМ від 0,31 до 0,5 mass.% зношування зразка зростає, а отже, і зносотривкість ТМ зменшується в 1,1 рази (рис. 2b).

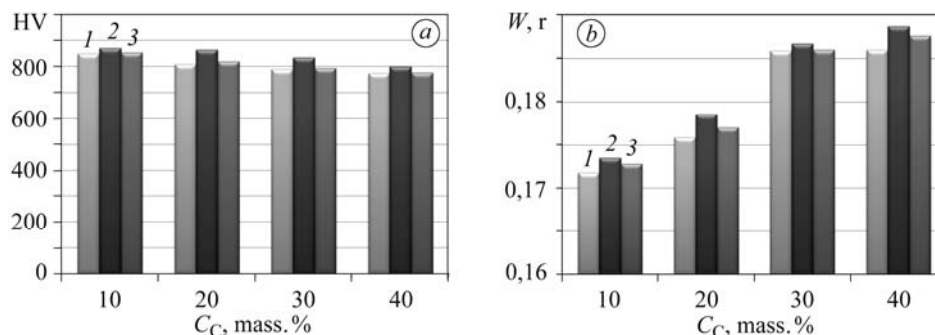


Рис. 2. Вплив вмісту вуглецю та бору на мікротвердість (а) та знос W зразка триботехнічних матеріалів під час випробовувань жорстко закріпленим абразивом (b): 1 – TiFe-xC-0,31B; 2 – TiFe-xC; 3 – TiFe-xC-0,5B.

Fig. 2. Influence carbon and boron on microhardness (a) and wear resistance W for TM sample under friction condition tests with rigidly fixed abrasive (b): 1 – TiFe-xC-0.31B; 2 – TiFe-xC; 3 – TiFe-xC-0.5B.

Зносотривкість за сухого тертя. Для всіх пар тертя ТМ-сталь ШХ15 коефіцієнт тертя дещо нижчий, ніж для пари тертя сталь 45-ШХ15 (табл. 2), інтенсивність зношування зразків ТМ також незначно нижча, порівняно зі сталлю 45. Інтенсивність зношування сталеві кульки (контртіла) також є більшою в парі тертя зі сталлю 45.

Таблиця 2. Результати випробувань на тертя та зношування зразка ТМ системи TiFe-xC за сухого тертя на повітрі

Фізичний склад порошків	Коефіцієнт тертя η	Інтенсивність зносу I , $\mu\text{m}/\text{km}$	
		зразка	контртіла
Швидкість ковзання індентора $v = 1,6 \text{ mm/s}$, $P = 2,5 \text{ kN}$			
TiFe	0,1	0,55	0,9
TiFe-10C	0,11	0,54	0,9
TiFe-20C	0,12	0,55	0,95
55Ti-20C-30Fe-0,31B	0,13	0,56	0,95
55Ti-20C-30Fe-0,5B	0,135	0,561	0,95
Сталь 45	0,15	0,56	1,05

Дещо менший коефіцієнт тертя ТМ, ніж сталі 45, зумовлений утворенням на її поверхні оксидних плівок на основі заліза (рис. 3). На поверхні ТМ такі оксидні плівки відсутні очевидно через їх більшу тривкість до окиснення. Крім того, на поверхні сталі 45 (рис. 4a) видно крихіткі поздовжні мікрориступи, тоді як на поверхні зразків ТМ їх менше, що зумовлено нижчим коефіцієнтом тертя та наявністю графітної плівки.

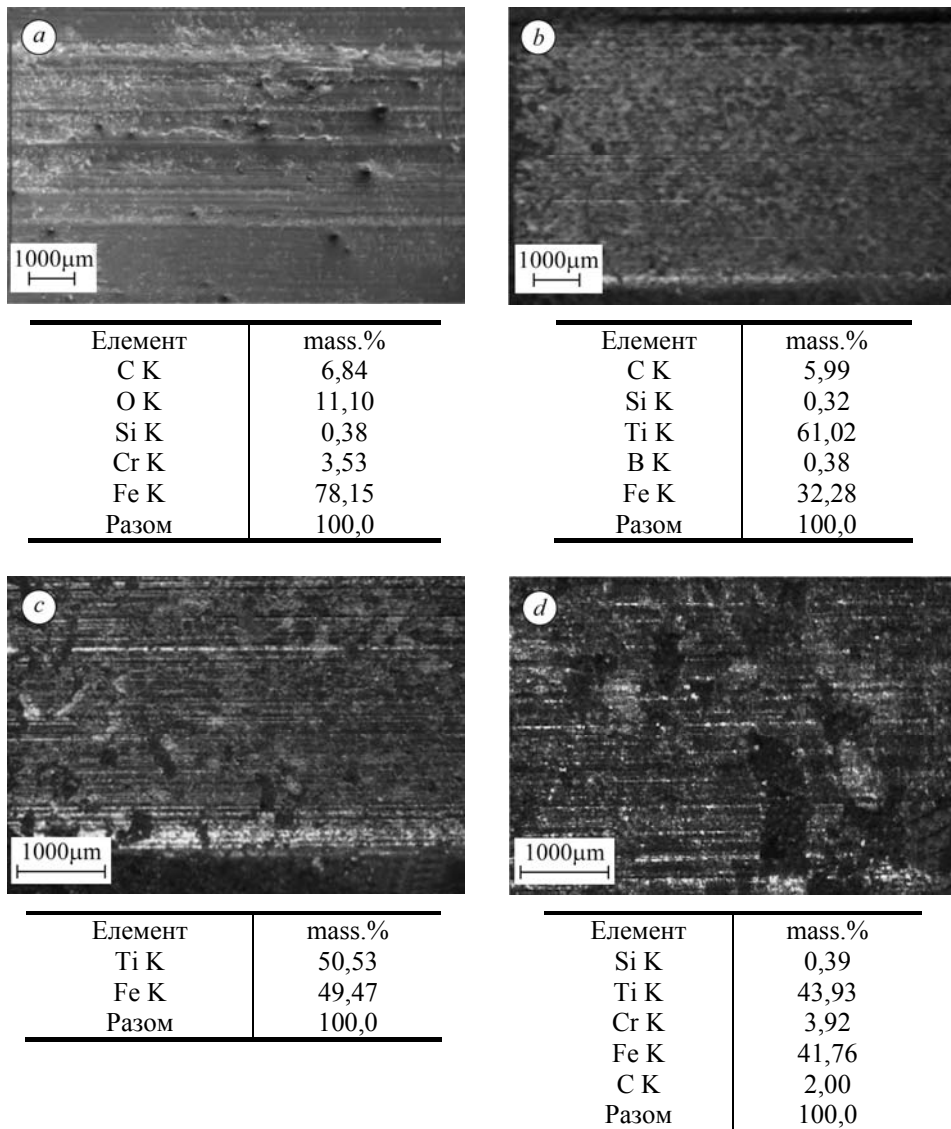


Рис. 3. Структура поверхні сталі 45 (a) та зразки триботехнічного матеріалу: 55Ti–20C–30Fe–0.31B (b); TiFe (c); TiFe–20C (d) після випробування в умовах сухого тертя.

Fig. 3. Structure of steel 45 surface (a) and tribotechnical material: 55Ti–20C–30Fe–0.31B (b); TiFe (c); TiFe–20C (d) after tests under dry friction condition.

ВИСНОВКИ

Коефіцієнт тертя ТМ в парі з контртілом ШХ15 за умов сухого тертя, кімнатної температури та малих навантажень до 2,5 kN є меншим, ніж для пари тертя сталь 45–сталь ШХ15.

Додавання бору 0,31 mass.% та 0,5 mass.% у структуру триботехнічного матеріалу на основі системи TiFe–xС дещо понижує температуру спікання, утворюючи евтектику, а також поліпшує його антифрикційні властивості.

Виходячи з показників мікротвердості, зносотривкості та структури усіх досліджених ТМ системи TiFe–xС, можна зробити висновок, що найоптимальнішим для неї буде додаток вуглецю 20 mass.% та бору 0,31 mass.%.

Розроблені СВС триботехнічні матеріали TiFe–20C та TiFe–20C–0,31B можна рекомендувати для роботи в умовах абразивного та сухого тертя.

РЕЗЮМЕ. Исследовано трибологические свойства и структуры материалов системы TiFe–xC, полученных самораспространяющимся высокотемпературным синтезом. Выявлено, что эти триботехнические материалы (ТМ) хорошо работают в условиях абразивного и сухого трения при умеренных нагрузках и комнатной температуре. Структура полученных материалов состоит из интерметаллидов Ti₂Fe, TiFe, которые являются термодинамически стабильными фазами с существенным теплообразованием. Добавление бора к системе TiFe–xC существенно снижает температуру основных критических точек соединений, расширяет диапазон температур синтеза. Установлено коэффициенты трения для пар трения шарик сталь ШХ15–TiFe–20C и шарик сталь ШХ15–сталь 45, которые при одинаковых условиях составляют 0,11 и 0,15, соответственно. Высокие прочностные показатели образцов ТМ TiFe–20C; TiFe–30C; 55Ti–20C–30Fe–0,31B дают возможность использовать эти материалы для защиты поверхностей створок сопел реактивных двигателей, что работают при высоких температурах и нагрузках.

SUMMARY. Tribological properties and structures of TiFe-xC system, received by self-propagating high-temperature synthesis were investigated. It was found that these tribotechnical materials work well in dry and abrasive friction conditions, under moderate load and at room temperature. The structure of the obtained materials consisting of intermetallics Ti₂Fe, TiFe which are thermodynamically stable phases with great warmth formation. Addition of boron to TiFe–xC system significantly reduces the temperature of main critical points of compounds, extends the temperature range of synthesis. It was found that friction coefficient equals 0.11 for friction pair TiFe–xC–ШХ15 steel and for friction pair ball ШХ15 steel–steel 45 equals 0.15. High strength characteristics of TiFe–20C; TiFe–30C; 55Ti–20C–30Fe–0.31B systems allow to use these materials for surface protection of leaf nozzles in jet engines working at high temperatures and loads.

1. Амосов А. П., Боровинская И. П., Мерзжанов А. Г. Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов: учеб. пос. / Под ред. В. Н. Анциферова. – М.: Машиностроение–1, 2007. – 567 с.
2. Мерзжанов А. Г. Концептуальный взгляд на проблему самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Фундаментальные и прикладные проблемы СВС: Материалы научн. семинара (29–30 сентября 2009 г., Томск, Россия). – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2009. – С. 93–109.
3. Мак Лин Д. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1965. – 431 с.
4. Morozov Yu. G. and Merzhanov A. G. Electrochemistry of SHS processes / Eds.: A. Borisov, A. G. Merzhanov and L. De Luca // Self-Propagating High-Temperature Synthesis of Materials. – NY: Taylor & Francis, 2002. – P. 77.
5. Гаркунов Д. Н. Триботехника (износ и безизносность): учебник. – М.: Изд-во МСХА, 2001. – 616 с.
6. Хвадагани А. И. Твердые сплавы на основе боридов титана и циркония, полученные методом СВС прессования: Дисс. ... канд. техн. наук. – Тбилиси, 1985. – 158 с.
7. Панов В. С., Чувиллин А. М. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них. – М.: МИСИС, 2001. – 428 с.
8. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Амбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
9. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун, Н. А. Буше и др. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.
10. Corrosion and wear behavior of alumina coatings obtained by various methods / T. Lampke, D. Meyer, G. Alisch, et al. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – 46, № 5. – P. 23–29. (Lampke T., Meyer D., Alisch G., et al. Corrosion and wear behavior of alumina coatings obtained by various methods // Materials Science. – 2010. – 46, № 5. – P. 591–598.)

Одержано 03.04.2013