

УДК 621.762

О.О. Онищук

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ТА ТРИБОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ TiFe-xC, ОТРИМАНОЇ САМОПОШИРЮЮЧИМ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИМ СИНТЕЗОМ(CBC)

Досліджено трибологічні властивості матеріалів системи TiFe-xC, отриманих самопоширюючим високотемпературним синтезом (CBC). Досліджено структуру та трибологічні властивості CBC-матеріалів систем TiFe-20C та TiFe-30C. Виявлено, що дані триботехнічні матеріали добре працюють в умовах абразивного тертя, сухого тертя, при помірних навантаженнях. Структура отриманих матеріалів складається з інтерметаліда: Ti₂Fe, TiFe, що є термодинамічно стабільною фазою з великою теплою утворення. Введення добавки бору до системи TiFe-xC суттєво знижує температуру основних критичних точок сполук, розширює діапазон температур синтезу. Встановлено, що коефіцієнт тертя для пари тертя кулька сталь ШХ15 - TiFe-20C при сухому терті, швидкості ковзання індентора 1,6 мм/с та навантаженні до 2,5 кН становить 0,11, тоді як за цих же умов для пари тертя кулька сталь ШХ15 - сталь 45 коефіцієнт тертя становить 0,15. Високі міцнісні показники зразків ТМ TiFe-20C, TiFe-30C дозволяють використовувати дані матеріали для захисту поверхонь створок сопел реактивних двигунів, що працюють при високих навантаженнях.

Ключові слова: CBC-матеріали, триботехнічні матеріали (ТМ), система TiFe-xC, сталь ШХ15, зносостійкість, коефіцієнт тертя, сухе тертя, абразивне тертя, самопоширюючий високотемпературний синтез (CBC).

Табл. 2. Рис. 9. Літ. 12.

О.О. Онищук

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ TiFe-xC, ПОЛУЧЕННОЙ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩИМСЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ СИНТЕЗОМ (CBC)

Исследованы трибологические свойства образцов триботехнических материалов (ТМ) системы TiFe-xC, полученных самораспространяющимся высокотемпературным синтезом (CBC). Также исследованы структура и трибологические свойства CBC-материалов систем TiFe-20C и TiFe-30C. Данные триботехнические материалы хорошо работают в условиях сухого трения, абразивного трения, невысокой нагрузке. Структура полученных материалов состоит из интерметаллидов: Ti₂Fe, TiFe, что является термодинамически стабильной фазой с большой теплотой образования. Введение добавки бора к системе TiFe-xC существенно снижает температуру основных критических точек, расширяет диапазон температур синтеза. Установлено, что для пары трения TiFe-xC-сталь ШХ15 при сухом трении, скорости скольжения индентора 1,6 мм/с и нагрузке до 2,5 кН коэффициент трения составляет 0,11 тогда как для пары трения шарик ШХ15-диск сталь 45 и этих же условий составляет 0,15. Высокие прочностные показатели образцов ТМ TiFe-20C, TiFe-30C позволяют использовать данные материалы для защиты поверхностей створок сопел реактивных двигателей, работающих при высоких нагрузках.

Ключевые слова: CBC-материалы, триботехнические материалы (ТМ), система TiFe-xC, сталь ШХ15, износостойкость, коэффициент трения, сухое трение, абразивное трение, самораспространяющийся высокотемпературный синтез (CBC).

О.О. Onushchuk

INVESTIGATION OF THE STRUCTURE AND TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE SYSTEM TiFe-xC, RECEIVED SELF-PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS (SHS)

It was investigated that tribological properties of the system TiFe-xC, received self-propagating high-temperature synthesis (SHS). Also, it was investigated that the structure and tribological properties of SHS materials of systems TiFe-20C and TiFe-30C. It was found that these tribotechnical materials work in the dry friction condition, abrasive friction condition, high load and temperature. The structure of the obtained materials consisting of intermetallic: Ti₂Fe, TiFe, which has thermodynamically stable phase with great warmth formation. It was introduced additions of boron to the system TiFe-xC which significantly reduces the temperature main critical points of system, extends temperature range synthesis. It was found that friction coefficient it equals 0,11 for this friction pair TiFe-xC- steel ШХ15 with velocity slip indenter 1.6 mm/s and loads up to 2.5 kN under the dry friction condition, whereas friction coefficient for friction pair ball ШХ15- disk 45steel under this conditions and it equals 0,15. That's why high strength characteristics of designs of ТМ of systems TiFe-20C, TiFe-30C can use these materials for surface protection leafs nozzles of jet engines, which working at high loads.

Keywords: wear resistance, friction coefficient, self-propagating high-temperature synthesis (SHS), tribotechnical materials (ТМ), dry friction condition, TiFe-xC, steel ШХ15.

Постановка проблеми. Проаналізувавши основні деталі та вузли сопла реактивних двигунів, встановлено, що найпроблемнішим з точки зору довговічності і зносостійкості є його створи, які через інтенсивну роботу в складних умовах високих температур та тертя дуже швидко зношуються, виходять з ладу і досить часто потребують заміни. Використання нових, надтвердих і зносостійких матеріалів дозволяють підвищити експлуатаційні характеристики частини сопла (його створок), а це відповідно продовжує довговічність роботи сопла в цілому.

© О.О. Онищук

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні створи сопла реактивних двигунів захищають наносючи на цю поверхню твердий гальванічний хром, який має високу твердість та корозійну стійкість у водних середовищах. Але варто відзначити екологічну небезпечність процесу гальванічного хромування.

Одним з найдешевших, найпродуктивніших та технологічно найпростіших технологій отримання матеріалів конструктивного і триботехнічного призначення є самопоширюючий високотемпературний синтез (СВС). Характер властивостей матеріалів залежно від способу їх отримання досліджували автори [1, 2, 3]. Отримані матеріали знаходять застосування в різних зносостійких частинах машин, покриттях, що працюють в умовах підвищених температур, тисків і навантажень. СВС - процес утворення інтерметалідів досліджувався в багатьох роботах (Комаров 1993, Авакаян 1994, Бовене і Дербі 1997). СВС- процес має низькі енергозатрати, короткий час синтезу, просте устаткування і високу якість продуктів. Проте структура і триботехнічні властивості інтерметалідів, отриманих СВС- процесом 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 за умов абразивного зношування.

Методика і матеріали. За вихідні матеріали взяли порошки титану, вуглецю, заліза і вуглецю. В результаті хімічного аналізу отримана чистота порошоків >99,5 % мас. . Хімічний, гранулометричний склади грубозернистих порошоків, їх властивості визначали по стандартах ISO: масова частка елементів- ISO 4496; гранулометричний склад Fe марки ПЖР3- ISO 4497; насипна щільність – ISO 3923; текучість- ISO 4490; ущільнення- ISO 3927. Питому поверхню TiC вимірювали за стандартом ISO 10070.

Розмір вихідних порошоків вуглецю становить 1 ... 5 мкм, титану 25... 30 мкм, заліза - від 10 до 50 мкм, крім того поряд з вихідними порошками звичайного гранулометричного складу брали також ультрадисперсні порошки Ti, C, Fe з розміром частинок від 20 до 100 нм.

Всі компоненти композиційних матеріалів попередньо піддали очистці розчином ацетону або спирту з метою видалення з поверхні частинок інших хімічних сполук і підвищення їх адгезії.

Формували декілька сумішей системи TiFe-xC з вмістом вуглецю 10, 20,30 мас. %.

Таблиця 1. Хімічний склад шихти зразка ТМ(триботехнічного матеріалу)

№	Система	Вміст елементів, мас. %		
		Ti	C	Fe
1.	Ti-C-Fe	50	0	50
2.	Ti-C-Fe	45	10	45
3.	Ti-C-Fe	40	20	40
4.	Ti-C-Fe	37,5	30	37,5

Змішування порошоків вихідних компонентів проводилося в кульковому млині об'ємом 2 дм³ протягом 8 годин. Далі кожен із сумішей пресували під тиском 150 МПа. Пресовки поміщали в реактор для СВС-процесу. Максимальна температура процесу 3000-3200 К. Отримані зразки охолоджували на повітрі протягом 40 хв.

Контроль температури горіння здійснювався вольфрам-ренієвими термопарами (діаметр спая 100 мкм) [5, 6]. Заміри проводили вна відстані 5 мм від неї.

Мікроструктурні дослідження і елементний аналіз виконувалися на скануючому електронному мікроскопі LEO 1450 CARI. Рентгеноструктурний і фазовий аналізи порошоків, пресовок і спечених зразків здійснювали на рентгенівському дифрактометрі "ДРОН-3".

Дослідження на зношування триботехнічних матеріалів здійснювали на установці для випробування матеріалів тертям у вакуумі за кімнатної температури, яка створена на базі серійної машини ИМАШ-20-75 (АЛА-ТОО) [10]. При цьому використали схему реверсивного тертя, яка дозволила дослідити знос матеріалу в процесі навантаження за схемою кулька-площина без мащення.

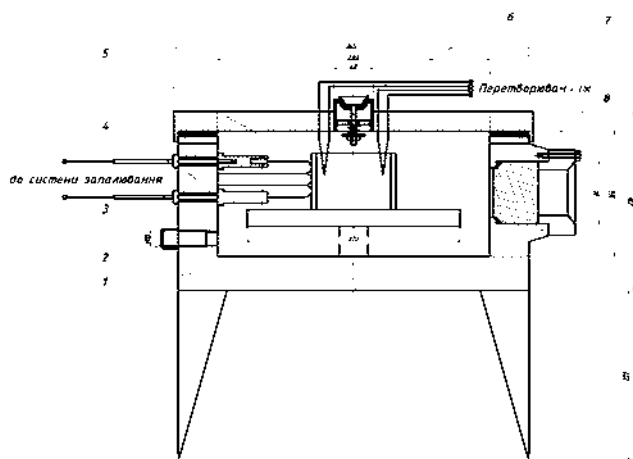


Рис. 1. Реактор для здійснення СВС процесу: 1 – корпус, 2 – штуцер, 3 – вольфрамова спіраль, 4 – предметний столик, 5 – контейнер з сумішшю, 6 – запобіжний клапан, 7 – термопари, 8 – вікно спостереження

Трибологічну поведінку досліджували за умов сухого тертя на повітрі, швидкості ковзання індентора 1,6 мм/с, навантаженнях 2,5 кН, тривалість випробування- 3500 с та в парі з контртілом – кулька марки сталь ШХ 15. (рис.2)

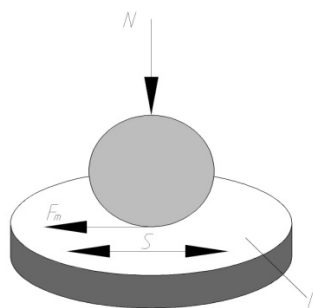
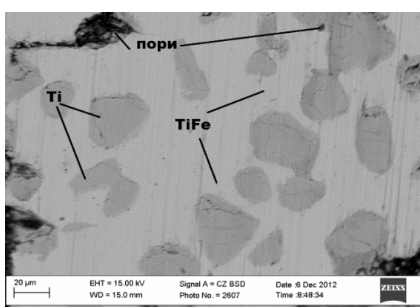


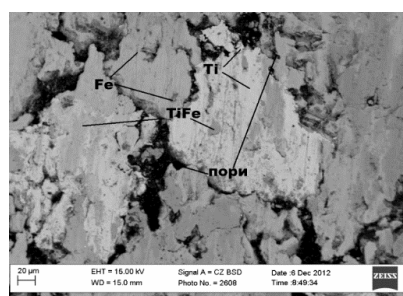
Рис. 2. Схема дослідження зносостійкості за схемою “кулька - диск” при сухому терті та температури 293 К

Абразивне зношування на тертя нежорстко закріпленими абразивом проводили згідно ГОСТ 23.208-79. Абразивне зношування на тертя жорстко закріпленим абразивом проводили з використанням абразивного диска з електрокорунду середньом’якої твердості СМ-2 на керамічній зв’язці 7К15 діаметром 150 та шириною 8 мм.

Результати дослідження. Структура триботехнічних матеріалів. В результаті електронної мікроскопії досліджено структуру отриманих матеріалів, яка складається з інтерметаліда: Ti_2Fe , $TiFe$, що є термодинамічно стабільною фазою з великою теплою утворення. На фотографіях видно сірі ділянки (інтерметалід- результат реакції), чорні ділянки (пори), світлі проміжки (непрореаговані в результаті реакції компоненти титану), темно - сірі ділянки (частинки заліза) (рис.3)



а) X500



б) X250

Рис. 3. Типова структура зразка триботехнічного матеріалу системи $TiFe$ після СВС: а) X500, б) X250

Проведений спектральний аналіз виявив крім Ti , Fe домішки бору, які виявлені в кількості $<0,4\%$. Бор з титаном утворює бориди титану TiB_2 і заліза, що поліпшує зносостійкість та покращує антифрикційні властивості ТМ. Введення добавки бору до системи $TiFe-xC$ суттєво знижує температуру основних критичних точок сполук, розширює діапазон температур, таким

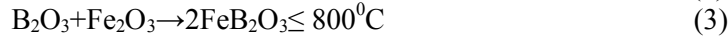
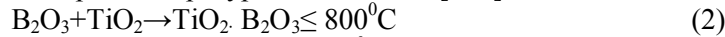
чином понижаючи температуру спікання, при цьому утворюється рідка евтектика. На границях зерен утворюються борати. Це сприяє швидкому та повному проходженню СВС-процесу шихти.

При добавці бору утворений борний ангідрид B_2O_3 [5]:



У цьому випадку формується більш дрібнозерниста структура з середнім розміром зерна 3...5 мкм, що сприяє підвищенню міцності, твердості, зносостійкості ТМ.

З окисленими атомами заліза і атомами титану B_2O_3 утворює борати титану $TiO_2 \cdot B_2O_3$ і борати заліза FeB_2O_3 при температурі нижче $800^{\circ}C$ [3, 6]:



Борат титану $TiO_2 \cdot B_2O_3$ та борат заліза FeB_2O_3 мають хороші розкислюючі та захисні властивості і тривало захищають триботехнічний матеріал від окислення [3,5].

Така структура зумовлює особливу трибологічну поведінку як за умов сухого тертя, так і під час тертя абразивом.

Абразивна зносостійкість триботехнічних матеріалів TiFe-xC. Дослідження зносостійкості залежно від способу кріплення абразиву показали, що найінтенсивніше зразки ТМ TiFe-xC зношуються за умов жорстко закріпленого абразиву та зі зростанням вмісту вуглецю. (рис.4).

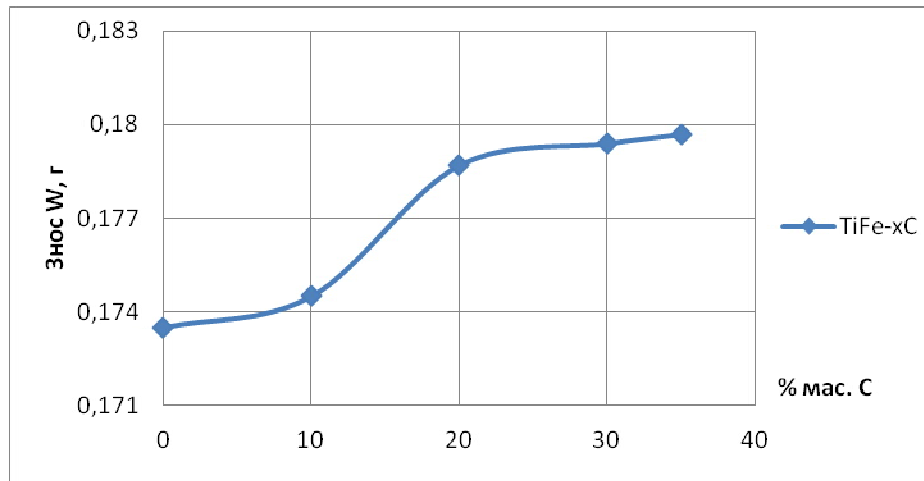


Рис. 4. Вплив вмісту вуглецю в системі TiFe-xC на величину зносу W зразка ТМ при випробуваннях жорстко закріпленим абразивом

Встановлено, що за жорстко закріпленого абразива поверхня триботехнічних матеріалів зношується досить рівномірно (рис. 5). На поверхні хімічно гетерогенних ТМ виявлено виступи, які згідно зі спектральним аналізом сформовані із твердих фаз – боридів заліза.

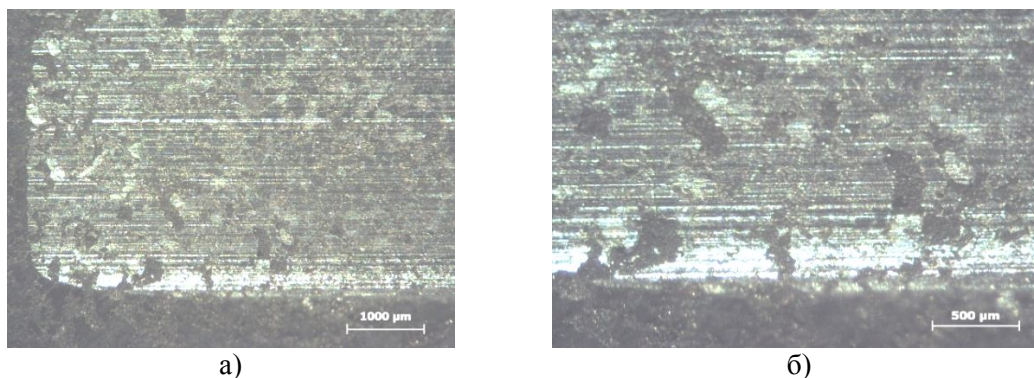


Рис. 5. Рельєф поверхні тертя зразка ТМ систем при жорстко закріпленому абразиві: а) TiFe-10C, б) TiFe-20C

У ТМ системи TiFe-xC із більшою твердістю утворюються тріщини, що виникають під час випробувань на абразивну зносостійкість (рис. 6). Наприклад, знос системи 40Ti-40Fe-20C з

твердістю *HRA* 84,5 є дещо більшим, ніж системи 50Ti-50Fe з твердістю *HRA* 85. Зношування ТМ відбувається шляхом росту тріщин, що виникли вздовж межі зерен зразка і існуючих пор (рис.7).

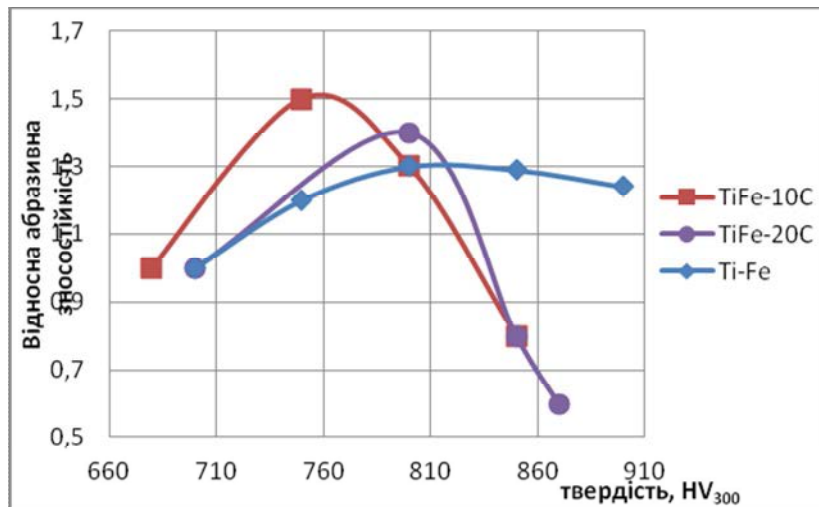


Рис. 6. Вплив твердості HV₃₀₀ на відносну абразивну зносостійкість зразків ТМ: Ti-Fe, TiFe-10C, TiFe-20C(жорстко закріпленій абразив)

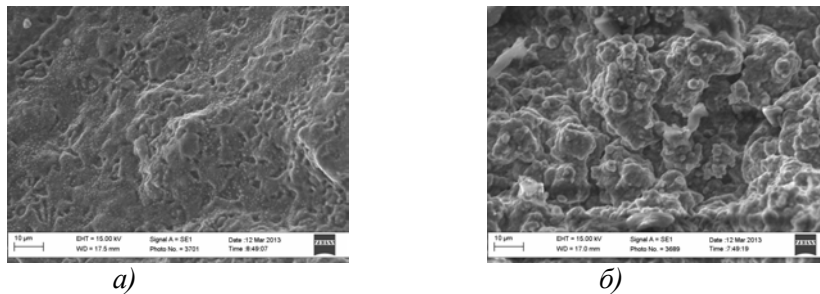
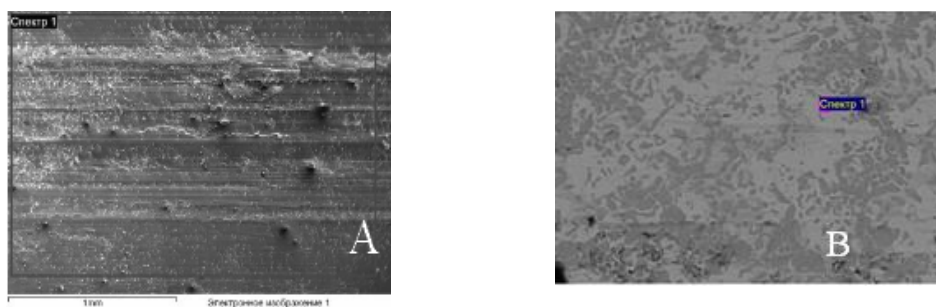


Рис. 7. Фрактограми руйнування зразка з ТМ після СВЧ X1000: а) системи TiFe-20C, б) системи TiC-30Fe

Зносостійкість при сухому терті. Встановлено, що для пари тертя TiFe-xC- сталь ШХ15 при зовнішньому нагріві до 293К, швидкості ковзання індентора 1,6 мм/с та навантаженні до 2,5 кН коефіцієнт тертя дещо нижчий, ніж для пари тертя кулька ШХ15- диск сталь 45.

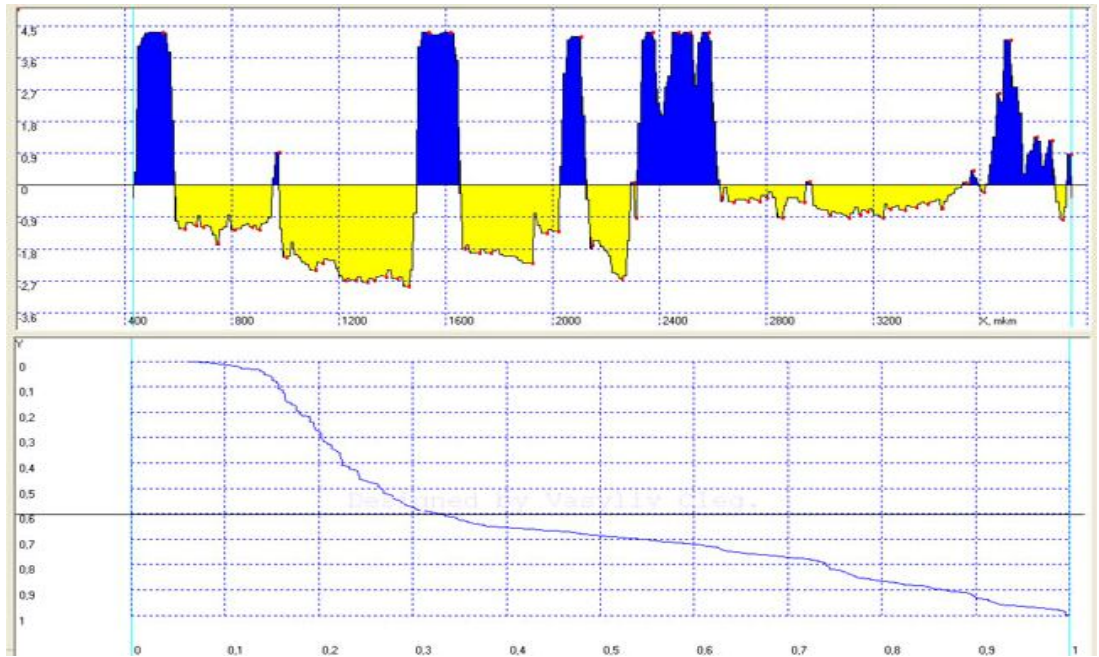


Елемент	Ваг. %
С К	6,84
О К	11,10
Si К	0,38
Cr К	3,53
Fe К	78,15
Разом	100,0

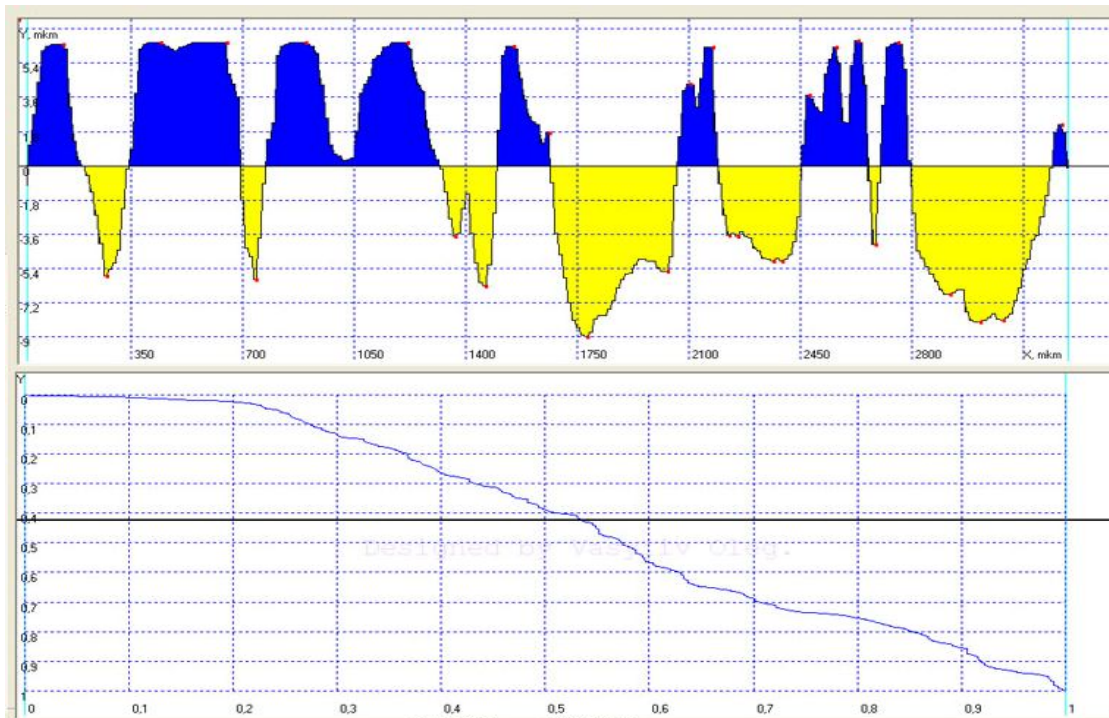
Елемент	Ваг. %
С К	5,99
Si К	0,32
Ti К	61,02
В К	0,38
Fe К	32,28
Разом	100,0

Рис. 8. Структура поверхні сталі 45: А) та зразка триботехнічного матеріалу TiFe-20C; Б) після випробування на сухе тертя

Такий низький рівень коефіцієнта тертя зумовлений наступним. Досліди на тертя та зношування зразків TiFe-20C показують вплив висоти та форми нерівностей на коефіцієнт тертя [5, 8, 9]. Триботехнічні матеріали мають на своїй поверхні пори глибиною до мікрона на відміну від сталі 45, профілографи яких наведено на рис. 9.



a)



b)

Рис. 9. Профілограма триботехнічного матеріалу TiFe-20C: а) після шліфування, б) після тертя

При вивченні областей тертя пари тертя диск(зразки системи TiFe-20C і системи TiFe-30C) і контртіло сталь ШХ15 отримали, що за питомого навантаження до 2,5 кН інтенсивність зношування зразка ТМ TiFe- 20C вища, ніж TiFe- 30C.

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

№	Система	Дослід №1			Дослід №2		
		k _{тертя}	I _{зразка} , МК М/КМ	I _{контргіла} , МК М/КМ	k _{тертя}	I _{зразка} , М КМ/КМ	I _{контргіла} , МКМ/КМ
Швидкість ковзання індентора v=1,6 мм/с , на повітрі при P=2,5 кН							
1	TiFe	0,1	0,55	1,1	0,103	0,55	0,75
2	TiFe-10C	0,11	0,58	1,15	0,104	0,5	0,75
3	TiFe-20C	0,12	0,6	1,2	0,13	0,5	0,75
4	TiFe-30C	0,15	0,61	1,3	0,151	0,52	0,77
5	TiFe-35C	0,156	0,62	1,32	0,157	0,54	0,78

Високі міцнісні показники зразків ТМ TiFe-20C, TiFe-30C (дослід №1 та №2) дозволяють використовувати дані матеріали для захисту поверхонь створок сопел реактивних двигунів, що працюють при помірних температурах і навантаженнях.

Висновки. Коефіцієнт тертя триботехнічного матеріалу в парі з контргілом ШХ15 за умов сухого тертя та кімнатної температури, при малих навантаженнях до 2,5 кН є меншим, ніж для пари тертя сталь 45- сталь ШХ15.

Добавка бору до 1% мас.у структуру триботехнічного матеріалу на основі системи TiFe-xC дещо знижує температуру спікання даного матеріалу, утворюючи евтектику, а також підвищує зносостійкість і покращує антифрикційні властивості

В результаті аналізу впливу кожного з компонентів на структуру сполуки ТМ TiFe-xC найбільш оптимальним для цієї системи буде добавка вуглецю у сполуці у розмірі 20-25 мас. %.

Розроблені СВС - матеріали триботехнічного призначення TiFe-20C та TiFe-30C можна рекомендувати для роботи в умовах недосить високих температур, абразивного та сухого тертя.

1. Амосов А.П. Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов: учеб. пособие. / А.П. Амосов, И.П. Боровинская, А.Г. Мержанов; под научной редакцией В.Н. Анциферова. — М.: Машиностроение-1, 2007. — 567 с.
2. Мержанов А.Г. Концептуальный взгляд на проблему самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / А.Г. Мержанов // Фундаментальные и прикладные проблемы СВС: Материалы научного семинара (29-30 сентября 2009 г., г. Томск, Россия). — Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2009. — С. 93-109.
3. Д. Мак Лин. Механические свойства металлов / Д. Мак Лин — М.: «Металлургия», 1965. — 431 с.
4. Morozov Yu.G., Merzhanov A.G. Electrochemistry of SHS processes / Yu.G. Morozov, A.G. Merzhanov // Self-Propagating High-Temperature Synthesis of Materials. Eds. .A.Borisov, A.G.Merzhanov and L.De Luca. NY: Taylor & Francis. 2002. p. 77.
5. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безизносность): учебник. — 4-е изд., перераб. и доп. / Д.Н. Гаркунов — М.: Издательство МСХА, 2001. — 616 с.
6. Хвадагани А.И. Твердые сплавы на основе боридов титана и циркония, полученные методом СВС прессования: дисс. кандидата технических наук: 05.16.06 / А.И. Хвадагани Тбилиси, 1985. — 158 с.
7. Панов В.С. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них / В.С. Панов, А.М. Чувилин — М.: МИСИС, 2001. — 428 с.
8. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Амбалов — М.: Машиностроение, 1977. — 526 с.
9. Чичинадзе А.В. Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учебник для технических вузов. 2-е издание переработ. и доп./ А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А.Буше и др.; под ред. А.В. Чичинадзе. — М.: Машиностроение, 2001. — 664 с.

Стаття надійшла до редакції 27.04.2013.