

УДК 620.1:621.762

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ СИСТЕМ TiFe-xC ТА TiC-xFe, ОТРИМАНИХ САМОПОШИРЮЮЧИМ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИМ СИНТЕЗОМ**О. О. Онишук**

Луцький національний технічний університет

вул. Львівська, 75, м. Луцьк, 43000, Україна. E-mail: oksankaduda@mail.ru

Досліджено фізико-механічні та трибологічні властивості матеріалів систем TiC-xFe та TiFe-xC, отриманих самопоширюючим високотемпературним синтезом (СВС). Для даних систем, скориставшись пакетом програм STATISTICA для аналізу вибірових даних усіх розроблених ТМ, вибрано зразки з найкращим комплексом фізико-механічних властивостей, а саме TiFe-20C, TiC-30Fe із додаванням бору 0,5 % мас. Досліджено структуру, пористість, твердість, міцність на стиск і коефіцієнт тертя СВС-матеріалів. Виявлено, що дані триботехнічні матеріали добре працюють в умовах тертя без мастильного матеріалу при помірних навантаженнях і кімнатній температурі. Додавання бору до систем TiC-xFe та TiFe-xC суттєво знижує температуру основних критичних точок сполук, розширює діапазон температур синтезу. Високі міцнісні та трибологічні показники зразків ТМ TiFe-20C, TiFe-30C дозволяють використовувати дані матеріали для виготовлення та ремонту втулок сопел реактивних двигунів, що працюють в умовах тертя без мастильного матеріалу та помірних навантаженнях.

Ключові слова: триботехнічні матеріали, самопоширюючий високотемпературний синтез, зносостійкість, коефіцієнт тертя, трибологічні властивості.

ИССЛЕДОВАНИЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМ TiFe-xC ТА TiC-xFe, ПОЛУЧЕННЫХ САМОРАСПРАСТРАНЯЮЩИМ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ СИНТЕЗОМ**О. О. Онишук**

Луцкий национальный технический университет

ул. Львовская, 75, г. Луцк, 43000, Украина. E-mail: oksankaduda@mail.ru

Исследованы физико-механические и трибологические свойства материалов систем TiC-xFe и TiFe-xC, полученных самораспространяющим высокотемпературным синтезом (СВС). Для данных систем, воспользовавшись пакетом программ STATISTICA для анализа выборочных данных всех разработанных ТМ, выбрано образцы с лучшим комплексом физико-механических свойств, а именно TiFe-20C, TiC-30Fe с добавлением бора 0,5 % масс. Исследована структура, пористость, твердость, прочность на сжатие и коэффициент трения СВС-материалов. Обнаружено, что данные триботехнических материалы хорошо работают в условиях трения без смазочного материала при умеренных нагрузках и температуре. Добавление бора к системам TiC-xFe и TiFe-xC существенно снижает температуру основных критических точек сполук, расширяет диапазон температур синтеза. Высокие прочностные и трибологические показатели образцов ТМ TiFe-20C, TiFe-30C позволяют использовать данные материалы для изготовления и ремонта втулок сопел реактивных двигателей, работающих в условиях трения без смазочного материала и умеренных нагрузках.

Ключевые слова: триботехнические материалы, самораспространяющий высокотемпературный синтез (СВС), износостойкость, коэффициент трения, трибологические свойства.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. На сьогодні, одним із конкурентноспроможних процесів сучасного виробництва є ресурсо- та енергозберігаюча технологія самопоширюючого високотемпературного синтезу (СВС). Це різновид горіння, в якому утворюються цінні тверді матеріали, шляхом переміщення хвилі хімічної реакції у суміші реагентів з утворенням твердих кінцевих продуктів, що призводить до синтезу матеріалів [1–3]. Суть даного процесу полягає у здатності порошкоподібних елементів, речовин, газів (шихтових сумішей, пресовок) у визначених вмістах загорятися при локальному нагріві. Як правило, взаємодіючі компоненти підбирають у стехіометричних співвідношеннях, тому “зайвих” газопродуктів не утворюється, хімічна реакція перебігає без вибуху. У ролі прискорюючого реакцію реагента може виступати реакційне тепловиділення або який-небудь продукт реакції, тобто, горіння має теплову природу. Тепло, що виділяється, розігріває реагуючу суміш і призводить до теплового самоприскорення реакції, тобто, в даному випадку реакції взаємодії є екзотермічними,

що сприяє плавленню, спіканню кінцевих продуктів. Але такі сплави – спеки – в більшості своїй неформовані, мають тріщини. Тому їх дроблять, перемелюють та у порошкоподібному вигляді вводять у шихту композиційних спечених матеріалів, у тому числі і триботехнічного призначення [2–4]. Методика СВС проста: з порошоків-реагентів готується суміш, яка розміщується (у вигляді вільної засипки або спресованих таблеток) в установку, куди подається кисень (за необхідності) і проводиться ініціювання спалаху [3]. Після проходження хвилі горіння (синтезу) і охолодження продукту отримується готовий продукт. Зазвичай, завданням дослідження визначаються параметри, які найбільше впливають на СВС-процес і на якість синтезованих оксидів. Такими основними параметрами виявилися: склад вихідної суміші, дисперсність компонентів, розміри і щільність вихідних зразків, тиск пресування. Технологічні переваги СВС закладені в самому принципі використання теплоти хімічних реакцій замість нагріву речовини від зовнішнього джерела, тому, СВС-процеси навіть у найпростішому варіанті

успішно конкурують із традиційними енергоємними технологіями [1, 2]. Важливість проблеми, як часто це буває, стимулює ґрунтовні наукові дослідження. У результаті цих досліджень з'ясована роль чинників, що керують хімічним і фазовим складом продуктів горіння і швидкістю процесу; розглянуто механізм перетворення реагентів у хвили горіння; сформульовані підходи до математичного опису СВС-процесів [3]. Аналіз робіт щодо покращення основних фізико-механічних властивостей матеріалів триботехнічного призначення показав, що використання таких матеріалів, як Ti, C, Fe дає змогу отримати нові зносостійкі матеріали. Однією з необхідних умов підвищення зносостійкості матеріалу є створення в ньому гетерогенної структури – пластичної матриці із твердими включеннями. Перспективними матеріалами для вирішення поставленої мети є порошкові матеріали: титан, що має високу міцність, корозійну стійкість, питому міцність, високу твердість; залізо, що має високу пластичність. Виходячи з цього, досліджувалися структури, фізико-механічні та трибологічні властивості систем TiC-xFe та TiFe-xC.

Мета роботи – встановити основні закономірності формування структури та фізико-механічних властивостей триботехнічних матеріалів систем TiFe-xC та TiC-xFe, отриманих СВС-процесом, а також визначити вплив бору на структурні, фізико-механічні та трибологічні характеристики систем TiFe-xC і TiC-xFe матеріалів триботехнічного призначення після СВС.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Для формування шихт зразків системи Ti-C-Fe використовували методику розрахунку з урахуванням кількості стехіометричних коефіцієнтів вихідних компонентів, чистоти і насипної густини вихідної шихти.

Таким чином, розраховано два хімічних склади шихти зразків ТМ: склад № 1 – TiC-xFe (карбід титана з домішками заліза); склад № 2 – TiFe-xC (інтерметалід із домішками вуглецю) (табл. 1).

Таблиця 1 – Розрахований хімічний склад шихти зразка ТМ (триботехнічного матеріалу)

Система	Вміст елементів, % мас.			
	Ti	C	Fe	B
Ti-C-Fe (склад № 1)	66,7	33,3	–	–
	61,5	28,5	10	–
	56,5	23,5	20	–
	51,5	18,5	30	–
	46,5	13,5	40	–
	41,5	8,5	50	–
Ti-C-Fe (склад № 2)	51,5	18,5	30	0,5
	50	–	50	–
	45	10	45	–
	40	20	40	–
	35	30	35	–
	30	40	30	–
	25	50	25	–
40	20	40	0,5	

Далі отримані суміші змішували та пресували. Для здійснення СВС процесу зразка системи Ti-C-Fe використовували лабораторний реактор [4]. Дана установка є посудиною відкритого типу циліндричної форми сталі X18H9T (рис. 1).

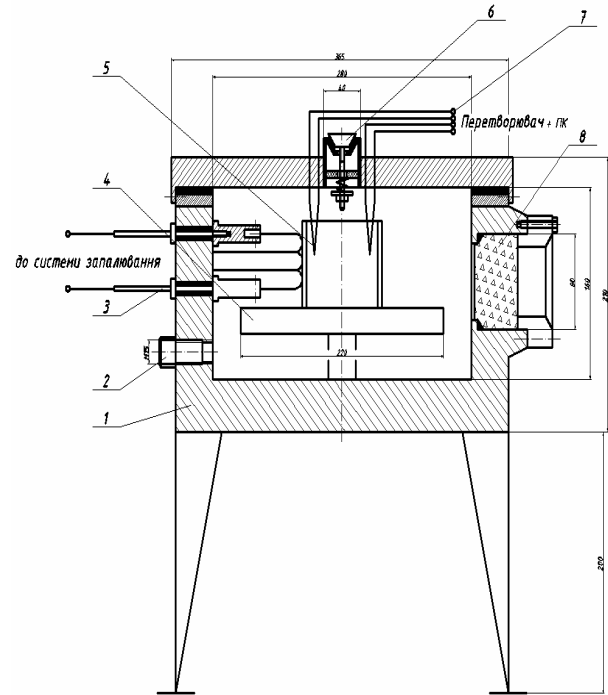


Рисунок 1 – Реактор для здійснення СВС-процесу:
1 – корпус; 2 – штуцер; 3 – вольфрамова спіраль;
4 – предметний столик; 5 – контейнер із сумішшю;
6 – запобіжний клапан; 7 – термопарі;
8 – вікно спостереження

Електронномікроскопічні дослідження матеріалів проводили за допомогою скануючого електронного мікроскопу ZEISS EVO 40XVP із системою рентгенівського мікроаналізу INCA Energy та електронного мікроскопа МИМ-10.

Структурні характеристики, хімічний аналіз на вміст кисню, твердість за Роквеллом і Віккерсом визначали згідно ГОСТ 20018–74, ГОСТ 8505–84, ГОСТ 20017–74 відповідно.

Характеристики міцності композиційного матеріалу визначали відповідно до ГОСТ 7668–82, ГОСТ 20019–74, ГОСТ 25602–80 на розривній машині УММ-5. Міцність на стиск визначали за ГОСТ 14759–69 на машині МИ-40 при швидкості переміщення нижньої траверси 2 мм/хв.

Дослідження зносостійкості здійснювали на дослідній установці для випробування матеріалів тертям без мастильного матеріалу за кімнатної температури, яка створена на базі серійної машини ИМАШ 20–75 за схемою “диск–контртіло”. Для досліджень використовували зразки: “диск” (зовнішній діаметр $\varnothing 0,52 \pm 0,02$ м, $h=0,16$ м) та “контртіло” – кулька з ШХ15. Для досліджень застосовували: зразок “диск”, виготовлений із заданих шихт систем TiC-xFe та TiFe-xC методом СВС, та як еталон – пласкі зразки сталі 45. Як контртіло використовували кульку зі сталі ШХ15.

Результати вимірювань міцності, твердості піддавали статистичній обробці, а саме пакету програм STATISTICA для аналізу вибірових даних.

В умовах промислового експерименту основна мета, зазвичай, полягає у отриманні максимальної кількості об'єктивної інформації про вплив досліджуваних факторів на процес за допомогою найменшого числа дорогих спостережень.

Більшість факторів (компоненти суміші) при проведенні експерименту змінюються та можуть бути встановлені на заздалегідь обраних рівнях. Перед побудовою моделей взаємодії компонентів суміші спочатку сплановано експеримент: складено план, що складається зі списку складів сумішей (табл. 1), для яких згодом проводиться вимірювання характеристик зразка ТМ – твердості, міцності.

У нашій задачі при плануванні серії експериментів було проведено 14 дослідів із різними комбінаціями компонентів системи Ti-C-Fe.

У нашому випадку розглядається суміш компонентів Ti-Fe-C зразка триботехнічного матеріала, які утворюють в сумі 100 %, а також вплив кожного компоненту та їх взаємодії на характеристики зразка ТМ (твердість, міцність). Для даного типу завдань існує спеціальний метод аналізу експериментів – аналіз суміші (рис. 2, 3).

Коефф. (исходные комп.); Прм.:ТВЕРДИСТ; R-кв.= 7285;Скор. 5022 (Ti-Fe-C) 3 факт. план для см.; общее знач. см. =100., 12 оп. ЗП: ТВЕРДИСТ; Остаточн.SS=410.188						
Фактор	Коефф.	Ст.Ош.	t(6)	p	-95. % Дов.Пред	+95. % Дов.Пред
(A)Ti	-1.795741	119.4291	-0.015036	0.988491	-294.028	290.4368
(B)C	0.00176	1.7467	0.001006	0.999230	-4.272	4.2759
(C)FE	1.50113	56.8874	0.026388	0.979804	-137.697	140.6997
AB	0.20247	3.5821	0.056524	0.956759	-8.563	8.9675
AC	0.13148	3.5255	0.037295	0.971460	-8.495	8.7582
BC	-0.06871	1.8209	-0.037735	0.971123	-4.524	4.3869

Рисунок 2 – Аналіз суміші із трьома компонентами (фактори Ti, C, Fe) для зразка системи Ti-C-Fe для твердості

Коефф. (исходные комп.); Прм.:МИЦНИСТЬ; R-кв.= 9016;Скор. 8196 (Ti-Fe-C) 3 факт. план для см.; общее знач. см. =100., 12 оп. ЗП: МИЦНИСТЬ; Остаточн.SS=1321.255						
Фактор	Коефф.	Ст.Ош.	t(6)	p	-95. % Дов.Пред	+95. % Дов.Пред
(A)Ti	265.7316	214.3444	1.23974	0.261358	-258.750	790.2134
(B)C	7.3406	3.1349	2.34156	0.057721	-0.330	15.0115
(C)FE	134.6145	102.0982	1.31848	0.235435	-115.211	384.4399
AB	-7.8050	6.4289	-1.21405	0.270342	-23.536	7.9259
AC	-7.6576	6.3274	-1.21022	0.271703	-23.140	7.8251
BC	3.9589	3.2680	1.21140	0.271283	-4.038	11.9555

Рисунок 3 – Аналіз суміші із трьома компонентами (фактори Ti, C, Fe) для зразка системи Ti-C-Fe для міцності

На основі рис. 4 і 5 побудовано діаграми Парето. Для твердості видно (значення коефіцієнтів регресії вказані на рис. 2): наприклад, навпроти C (Fe) стоїть цифра 0,49 – це означає, що в середньому при зміні на 1 % значення Fe, твердість збільшується на 0,49

одиниці. Коефіцієнт із негативним знаком показує, що збільшення % мас. цих елементів.

Для міцності видно, значення коефіцієнтів регресії вказані на рис. 4: наприклад, навпроти B (C) стоїть цифра -1,11 – це означає, що в середньому при зміні на 1 % значення C, міцність зменшується на 1,11 одиниці.



Рисунок 4 – Діаграма Парето для зразка системи Ti-C-Fe з 3-ма компонентами для твердості

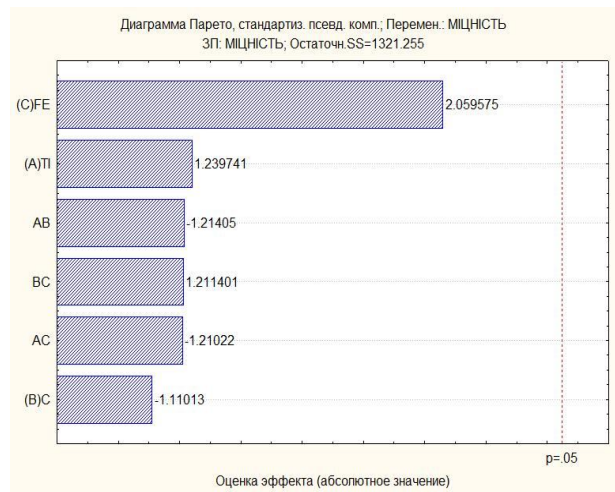


Рисунок 5 – Діаграма Парето для зразка системи Ti-C-Fe з 3-ма компонентами для міцності

Діаграми Парето (рис. 4, 5) показують оцінки виділених компонентів, тобто оцінки ефектів і їх взаємодій (взаємодії закодовані латинськими літерами, наприклад BC означає взаємодію C (Fe) і B (C)).

Таким чином, на основі отриманого планування експерименту можемо оцінити ступінь впливу кожного компонента та їх стехіометричного співвідношення на фізико-механічні показники отриманого зразка ТМ.

Дослідження структури. Металографічним методом отримані структури зразків ТМ систем TiC-xFe та TiFe-xC та визначена пористість на основі просвіту матеріалу за мікрофотографіями.

Отримана структура зразків триботехнічних матеріалів системи TiC-xFe після СВС складається з

матриці (γ -фази) – складнолегованого твердого розчину на основі TiC із граткою типу ГЦК із включеннями заліза (рис. 6).

Пористість зразків системи TiC-xFe регулюється тиском пресування, який знаходиться в межах 270–460 МПа.

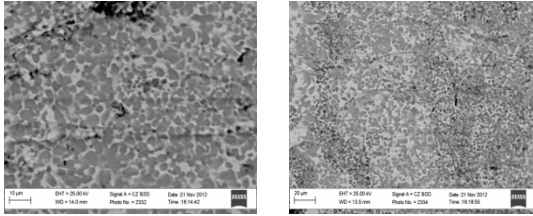


Рисунок 6 – Структура зразка ТМ системи TiC-10Fe після СВС: а – X 1000, б – X 500

Структура зразків ТМ системи TiFe-xC є за структурою інтерметалідом фз включеннями вуглецю. На фотографіях (рис. 7) видно сірі ділянки (інтерметалід – результат реакції), чорні (пори), світло-сірі (непрореаговані в результаті реакції частинки титану), темно-сірі (непрореаговані в результаті реакції частинки заліза). На рис. 7 показано, що структура спеченого матеріалу при збільшенні вмісту інтерметалідної фази послідовно трансформується із матричної в каркасну, в тому числі в евтектичну, а потім – в однофазну інтерметалідну.

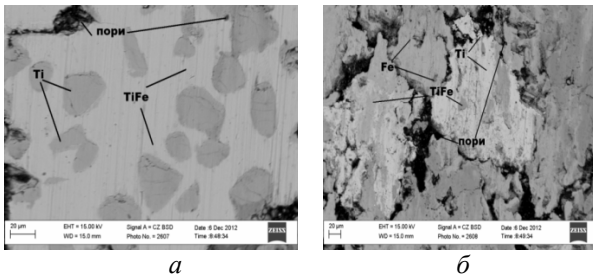


Рисунок 7 – Структура зразка з триботехнічного матеріалу системи TiFe: а – X500, б – X250

Результати досліджень отриманих інтерметалідів TiFe-10C, TiFe-20C свідчать про їх високі експлуатаційні характеристики, навіть незважаючи на наявність деякої залишкової пористості (5–7 %).

Додавання 0,1–0,5 % мас. аморфного бору до систем TiC-xFe та TiFe-xC зразка ТМ дозволяє знизити залишкову пористість на 1 %. Крім того, додавання бору до систем TiC-xFe та TiFe-xC утворює більш дисперсну структуру та покращує фізико-механічні характеристики триботехнічного матеріалу.

Дані порівняльної оцінки структурних характеристик матеріалу системи TiC-xFe та TiFe-xC після СВС-процесу при оптимальних режимах тиску пресування (270–460 МПа) вказують на більш високу пористість зразка ТМ системи TiC-xFe, ніж системи TiFe-xC. Відмічено, що додавання бору до систем TiC-xFe та TiFe-xC до 2 % мас. аморфного бору чистотою 99,98 % суттєво знижує температуру основних критичних точок суміші, розширює діапазон

температур, понижаючи таким чином загальну температуру спікання системи TiC-xFe [5]. У результаті утворюється евтектика, яка становить твердий каркас, у проміжках якого розташована м'яка складова (твердий розчин бору).

Плівка B_2O_3 , що утворюється під час СВС-процесу, додатково слугує мастилом та утворює з оксидами заліза та титану більш складні оксидні системи – борати. Крім того, вона запобігає підвищенню температури на поверхні тертя вище температури плавлення B_2O_3 і температури плавлення можливо утворених боратів. Як наслідок, у процесі СВС на поверхні зразка ТМ можливе утворення системи $TiO_2 \cdot B_2O_3$ та боратів заліза на границях зерен, що сприяє швидкому та повному проходженню СВС-процесу шихти. Таким чином, формуються більш дрібнозерниста структура із середнім розміром зерна 3–5 мкм, що сприяє підвищенню міцності, твердості, зносостійкості триботехнічного матеріалу. Додавання аморфного бору в шихту триботехнічного матеріалу зменшує пористість зразків після СВС процесу [5, 8].

Отже, бор, введений в порошкову суміш, з одного боку, сприяє кращій взаємодії Ti-C-Fe, а з іншого боку, може хімічно взаємодіяти з TiC і Fe, утворюючи борати, що призводить до зміни фазового складу, структури та покращення фізико-механічних і трибологічних властивостей триботехнічного матеріалу.

Результати основних фізико-механічних і трибологічних властивостей системи TiC-xFe та TiFe-xC, отриманих СВС-процесом, показали, що останні мають високі значення твердості (HV 633-900) [6–8]. У той же час, застосування СВС-процесу призводить і до збільшення міцності на стиск триботехнічного матеріалу порівняно з матеріалами, отриманими традиційним спіканням.

З отриманих даних, що найкращим комплексом властивостей, в першу чергу, твердістю, міцністю володіють суміші № 2, 3 і 6 системи TiC-xFe та суміші № 1–3 системи TiFe-xC (табл. 2, 3). При цьому помічено, що всі системи леговані бором, мають більші значення межі міцності на стиск.

Таблиця 2 – Середні значення фізико-механічних властивостей зразка ТМ системи TiC-xFe ($P_{max}=460$ МПа)

Суміші	Твердість, HV	Границя міцності на стиск $\sigma_{ст}$, ГПа
TiC	633	3,12 ± 0,88
TiC-10Fe	653	3,35 ± 0,93
TiC-20Fe	694	3,49 ± 0,98
TiC-30Fe	790	3,47 ± 0,98
TiC-40Fe	800	3,25 ± 0,98
TiC-50Fe	810	3,25 ± 0,91
TiC-30Fe-0,5B	798	3,5 ± 0,98

Оптимальним комплексом фізико-механічних властивостей системи TiC-xFe володіють зразки ТМ

TiC-20Fe, TiC-30Fe після СВС. Вони мають міцність на стиск $\sigma_{ст}$ 3,49 та 3,47 ГПа та твердість HV 694–790 відповідно та відрізняються порівняно невеликою усадкою, мають доєвтектичну і досить крупнозернисту структуру матриці і включення карбиду.

Оптимальним комплексом фізико-механічних властивостей системи TiFe-xC володіють зразки ТМ на основі систем відповідно TiFe, TiFe-10C та TiFe-20C після СВС. Вони мають міцність на стиск $\sigma_{ст}$ на рівні 3,05, 3,25, та 3,3 ГПа відповідно, структуру інтерметаліду і утворюють суттєву каркасну структуру.

Таблиця 3 – Середні значення фізико-механічних властивостей зразка ТМ системи TiFe-xC ($P_{max}=460$ МПа)

Суміш	Твердість, HV	Границя міцності на стиск $\sigma_{ст}$, ГПа
TiFe	900	3,05 ± 0,88
TiFe-10C	878	3,25 ± 0,93
TiFe-20C	865	3,3 ± 0,98
TiFe-30C	832	3,15 ± 0,98
TiFe-40C	800	3,19 ± 0,98
TiFe-40C	772	3,18 ± 0,91
TiFe-20C-0,5B	873	3,33 ± 0,91

Вибравши зразок із найкращим комплексом фізико-механічних властивостей та інтерметалідною структурою, а саме TiC-30Fe, було проведено ряд трибологічних випробувань [9]. Зразок TiC-30Fe піддавався тертю без мастильного матеріалу.

Як показали експериментальні дослідження, зразок TiC-30Fe має нижчий коефіцієнт тертя та вищу зносостійкість, ніж еталон сталь 45.

Таблиця 4 – Результати випробувань на знос зразка ТМ систем TiFe-xC за умов тертя без мастильного матеріалу (контртіло кулька ШХ15, еталон сталь 45)

№	Склад порошоків	Коефіцієнт тертя f
Швидкість ковзання індентора $v = 1,6$ мм/с, $P = 2,5$ кН		
1	TiFe	0,1
2	TiFe-20C	0,12
3	55Ti-20C-30Fe-0,5B	0,135
4	Сталь 45	0,15

Дещо менший коефіцієнт тертя зразка ТМ, ніж у сталі 45, зумовлений виникненням на поверхні сталі 45 оксидних плівок. На поверхні зразка ТМ такі оксидні плівки зменшуються за рахунок додавання бору та утворення боратів заліза FeB_2O_3 та борату титану $TiO_2 \cdot B_2O_3$. Тоді як зразки ТМ мають на своїй поверхні пори глибиною до мікрона і малу кількість мікроступів.

Розроблені СВС-матеріали триботехнічного призначення TiC-30Fe із додаванням 0,5 % мас. бору

можна рекомендувати для роботи в умовах тертя без мастильного матеріалу, а також, виходячи з показників твердості і міцності, використовувати дані матеріали для виготовлення втулок сопла реактивного двигуна.

Крім того, розроблені триботехнічні матеріали TiC-30Fe та TiFe-20C (пористість 31,4 і 32,5 % відповідно) методом СВС володіють високим і стабільним коефіцієнтом тертя, достатньою зносостійкістю, міцністю, стійкістю до температурних перепадів, впливу агресивних середовищ.

ВИСНОВКИ. Додавання заліза, вуглецю та бору суттєво впливає на фізико-механічні властивості триботехнічних матеріалів системи Ti-Fe-C, а їх оптимальне масове співвідношення суттєво визначає фізико-механічні показники твердості та міцності.

Виходячи з цих показників та скориставшись пакетом програм STATISTICA для аналізу вибірових даних усіх розроблених ТМ систем TiFe-xC та TiC-xFe, найкращим комплексом фізико-механічних властивостей володіють зразки TiFe-10C, TiFe-20C, TiC-20Fe, TiC-30Fe з додаванням бору 0,5 % мас.

Дослідно-промислова перевірка показала, що матеріали TiFe-20C та TiC-30Fe, отримані методом СВС, забезпечують ефективну експлуатацію та надійність деталей сопла реактивного двигуна в умовах тертя без мастильного матеріалу, а також є економічною альтернативою твердих сплавів, отриманих методом порошкової металургії. Отримані матеріали TiFe-20C та TiC-30Fe мають високу твердість, володіють високим опором механічному стику та достатню зносостійкість.

ЛІТЕРАТУРА

1. Mechanical alloying in SHS research / F. Bernard, E. Gaffet // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. – 2001. – № 10. – PP. 109–132.
2. Мержанов А.Г. Концептуальный взгляд на проблему самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Фундаментальные и прикладные проблемы СВС: материалы научного семинара, 29–30 сентября 2009 г., г. Томск, Россия). – Томск: ИОА СО РАН, 2009. – С. 93–109.
3. Merzhanov A.G., Rogachev A.S., Sychev A.E. Self-propagating high-temperature synthesis: first space // Doklady Physical Chemistry [Translated from Doklady Akademii Nauk]. – 1998. – Vol. 362. – №. 2. – PP. 217–221.
4. Получение материалов методом СВС с использованием отходов машиностроительного производства / В.Д. Рудь, Л.М. Самчук, О.О. Дуда // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конфер. г. Могильов, 19–20 апреля 2012 г. – С.159–160.
5. Бор, его соединения и сплавы / Г.В. Самсонов, Л.Я. Марковский, А.Ф. Жигач, М.Г. Валяшко. – К.: Изд-во АН УССР, 1960. – 590 с.
6. Self-Propagating High-Temperature Synthesis: Theory and Practice (in Russian) / Ed. A.E. Sytshev. – Chernogolovka: Territory, 2001. – P. 432.
7. Morozov Yu.G., Merzhanov A.G. Electrochemistry of SHS processes // Self-Propagating

High-Temperature Synthesis of Materials / Eds. A. Borisov, A.G. Merzhanov and L. De Luca. – NY: Taylor & Francis, 2002. – P. 77.

8. Структури та трибологічні характеристики триботехнічних матеріалів TiFe-xC, отриманих самопоширюваним високотемпературним синтезом О.О. Онищук., В. Д. Рудь // Фізико-хімічна механіка

матеріалів (Materials Science). – 2013. – Т. 49, № 3. – С. 123–128.

9. Corrosion and wear behavior of alumina coatings obtained by various methods / T. Lampke, D. Meyer, G. Alisch, et al. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2010. – 46, № 5. – РР. 23–29.

RESEARCH OF THE TRIBOTECHNICAL MATERIALS OF TiFe-xC AND TiC-xFe SYSTEMS OBTAINED BY SELF-PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS

O. Onyschuk

Lutsk National Technical University

vul. Lvivska 75, Lutsk, 43000, Ukraine. E-mail: oksankaduda@mail.ru

It was investigated physical-mechanical and tribological properties of the TiC-xFe and TiFe-xC materials systems obtained by self-propagating high-temperature synthesis (SHS). It was selected samples with the best set of physical and mechanical properties for these systems, using the software package STATISTICA for analyzing the sample data of all developed tribotechnical materials (namely TiFe-20C, TiC-30Fe with addition of boron, 0.5 wt %). It was investigated the structure, porosity, hardness, compressive strength and the friction coefficient of SHS-materials. It has been found that these tribotechnical materials are applicable in unlubricated friction condition under moderate loads and temperatures. It was introduced additions of boron to TiC-xFe and TiFe-xC systems, which significantly reduces the temperature of main critical points of these compounds and extends of synthesis temperature range. That's why high strength characteristics of tribotechnical materials (TM) of TiFe-20C and TiFe-30C systems allow for these materials to be used in production and repair of sleeves of nozzles of the jet engines working in unlubricated friction condition under moderate loads and temperatures.

Key words: tribological materials (TM), self-propagating high-temperature synthesis (SHS), wear resistance, friction coefficient, tribological properties.

REFERENCES

1. Bernard, F. and Gaffet, E. (2001), "Mechanical alloying in SHS research", *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, vol. 10, no. 2, pp.109–132.

2. Merzhanov, A.G. (2009), "Conceptual view of the problem of self-propagating high-temperature synthesis", *Fundamental and applied problems of SHS*, IOA SO RAN, Tomsk, September 29–30, pp. 93–109.

3. Merzhanov, A.G., Rogachev, A.S., and Sychev, A.E. (1998), "Self-propagating high-temperature synthesis: first space experiments", *Doklady Fizicheskoi Khimii*, Translated from *Doklady Akademii Nauk*, vol. 362, no. 2, pp. 217–221.

4. Rud, V.D., Samchuk, L.M., and Duda, O.O. (2012), "Preparation of materials by SHS using waste engineering production", *Proceedings of the International Sci.-Tech. Conf. "Materials, equipment and energy saving technologies"*, Mogilov, April 19–20, 2012, pp. 159–160.

5. Samsonov, G.V., Markovskiy, L.Ya., Zhigach, A.F., and Valyashko, M.G. (1960), *Bor, ego soedineniya i splavyi* [Boron and its compounds and alloys], AN USSR, Kyiv, Ukraine.

6. Sytschev, A.E. (2001), *Self-Propagating High-Temperature Synthesis: Theory and Practice* (in Russian), Territory, Chernogolovka, Russia.

7. Morozov, Yu.G. and Merzhanov, A.G. (2002), "Electrochemistry of SHS processes", *Self-Propagating High-Temperature Synthesis of Materials*, Taylor & Francis, NY, USA.

8. Onyschuk, O.O. and Rud, V.D. (2013), "Structure and tribological properties of TiFe-xC tribotechnical materials received by self-propagating high-temperature synthesis (SHS)", *Materials Science*, vol. 49, no. 3, pp. 123–128.

9. Lampke, T., Meyer, D., and Alisch, G. (2010), "Corrosion and wear behavior of alumina coatings obtained by various methods", *Materials Science*, vol. 46, no. 5, pp. 23–29.

Стаття надійшла 20.01.2014.