

УДК 620.1:621.762

АБРАЗИВНА ЗНОСОТРИВКІСТЬ СПЛАВУ Ti–Fe–Cr, ОТРИМАНОГО САМОПОШИРЮВАЛЬНИМ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИМ СИНТЕЗОМ І МОДИФІКОВАНОГО БОРОМ І ВУГЛЕЦЕМ

О. О. ОНИЩУК

Луцький національний технічний університет

Подано результати досліджень впливу складу шихти на відносну абразивну зносотривкість матеріалу системи Ti–Fe–C–B–Cr, отриманого самопоширювальним високотемпературним синтезом. Встановлено, що після додавання вуглецю та бору гетерогенність структури та зносотривкість зростають. Виявлено, що внаслідок формування оптимального складу шихти і досягнення меншої поруватості матеріалу забезпечуються його найвищі трибологічні характеристики.

Ключові слова: самопоширювальний високотемпературний синтез, система Ti–Fe–C–B–Cr, склад шихти, втрати маси, зносотривкість, поруватість, твердість, бор, хром, вуглець.

Розвиток сучасної науки і техніки потребує матеріалів з високими трибологічними і фізико-механічними характеристиками. Самопоширювальний високотемпературний синтез (СВС) застосовують, як правило, в індивідуальному виробництві для розробки нових матеріалів та під час термічного зварювання металів [1, 2]. Останнім часом синтезовані нові сплави системи Ti–Fe–Cr, але їм властиві підвищена поруватість і відносно низька зносотривкість [2, 3]. Для поліпшення цих характеристик пропонують додатково легувати їх бором і вуглецем.

Матеріали та методи. За вихідні матеріали взяли технічно чисті порошки (μm) вуглецю (1...5), титану (5...15), бору (0,1...5) і хрому (1...5). Замість порошоків заліза використовували порошки сталі ШХ15 (10...40 μm) – шлам підшипникового виробництва, які змішували кульковому млині об'ємом 2 dm^3 упродовж 120 min з додаванням уайт-спіриту, що інтенсифікував синтез, запобігаючи розшаруванню порошкових компонентів шихти. Суміші пресували одностороннім холодним способом під тиском 460 МПа і одержували циліндричні зразки (висотою 0,018... 0,025 m та діаметром 0,05 m) площею в перерізі 0,012 m^2 . Перед СВС спресовані зразки сушили при 523...573 K у вакуумній шафі. СВС виконували у реакторі із корозійнотривкої сталі 0X18H9T, в якому зразок ставили на предметний столик, куди підводили термопари для вимірювання температури та вольфрамову електричну спіраль для ініціювання хімічної реакції горіння. Реактор закривали, а зразок нагрівали до пірофорності матеріалу (846 K). Фронт горіння розповсюджувався за зразком до протилежного від ініціувальної спіралі боку. Максимальна температура процесу 2773 K.

Для електронно-мікроскопічних досліджень спечених зразків застосовували сканівний електронний мікроскоп ZEISS EVO 40XVP зі системою рентгенівського мікроаналізу INCA Energy 350 та електронний МИМ-10. Питому густину вимірювали методом гідростатичного зважування на аналітичних терезах ВЛР-200. Поруватість матеріалів визначали металографічним методом, а мікротвердість – приладом ПМТ-3 за навантажень на індентор 0,49 N. Абразивне зношування за

випробувань нежорстко закріпленими абразивом здійснювали за ГОСТ 23.208-79. У зону контакту гумового круга (діаметром $50 \cdot 10^{-3}$ м, шириною $15 \cdot 10^{-3}$ м) і зразка дозувальним пристроєм безперервно подавали абразив. Режим тертя такий: навантаження $P = 2,5$ Н, швидкість обертання диска $v = 0,33$ м/с, частота обертання $n = 2,08$ rot/s, абразив – пісок (вологість не перевищувала 0,16%), розмір зерен абразиву $0,2 \dots 1 \cdot 10^{-3}$ м, час випробування 30 min. Використовували абразивний диск з електрокорунду середньої твердості СМ-2 на керамічній зв'язці 7К15 (діаметром 0,15 м та шириною 0,008 м). Зернистість електрокорунду 250...315 μm , лінійна швидкість тертя 1 м/с, тривалість випробувань 30 min, навантаження в зоні лінійного контакту $P = 1,5$ Н [4]. Абразивне зношування визначали за втратою маси зразків з похибкою $\pm 0,0002$ г. За одиницю відносної абразивної зносотривкості прийняли ступінь зношування еталона зі сталі 45. Зразки перед випробуванням та після кожного етапу тертя очищали технічним ацетоном (ГОСТ 2768-79) за допомогою ультразвуку на установці Vandelin Sonorex та висушували. Похибки під час вимірювання їх густини не перевищували $0,1 \text{ g/m}^3$, твердості – 10 МПа. Результати вимірювань твердості та зносотривкості статистично обробляли, використовуючи критерії Фішера та Стьюдента з кількістю експериментів $n = 5$ та ймовірністю $P = 0,95$, а також з допомогою програм STATISTICA.

Результати та їх обговорення. Маса суміші кожного зразка до пресування 100 г. Розраховували теоретичну поруватість кожного зразка

$$P_i = (1 - \rho_{ni} / \rho_{ki}) \cdot 100\%,$$

де за правилом адитивності

$$\rho_k = \frac{(\rho_{\text{Ti}} \cdot \rho_{\text{Fe}} \cdot \rho_{\text{C}} \cdot \rho_{\text{Cr}} \cdot \rho_{\text{B}})}{(\rho_{\text{Fe}} \cdot \rho_{\text{C}} \cdot \rho_{\text{Cr}} \cdot \rho_{\text{B}})C_{\text{Ti}} + (\rho_{\text{Ti}} \cdot \rho_{\text{C}} \cdot \rho_{\text{Cr}} \cdot \rho_{\text{B}})C_{\text{Fe}} + (\rho_{\text{Ti}} \cdot \rho_{\text{Fe}} \cdot \rho_{\text{Cr}} \cdot \rho_{\text{B}})C_{\text{C}}} + \frac{(\rho_{\text{Ti}} \cdot \rho_{\text{Fe}} \cdot \rho_{\text{C}} \cdot \rho_{\text{Cr}} \cdot \rho_{\text{B}})}{(\rho_{\text{Ti}} \cdot \rho_{\text{Fe}} \cdot \rho_{\text{C}} \cdot \rho_{\text{B}}) \cdot C_{\text{Cr}} + (\rho_{\text{Ti}} \cdot \rho_{\text{Fe}} \cdot \rho_{\text{C}} \cdot \rho_{\text{Cr}})C_{\text{B}}},$$

тут ρ_{ni} та ρ_{ki} – питома густина, отримана експериментально, та компактна суміші сплаву Ti–Fe–Cr–C–B, kg/m^3 ; C_{Ti} , C_{Fe} , C_{C} , C_{Cr} , C_{B} – масова частка компонентів шихти; $\rho_{\text{Cr}} = 7,19 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$; $\rho_{\text{C}} = 2,25 \cdot 10^3$; $\rho_{\text{B}} = 1,73 \cdot 10^3$; $\rho_{\text{Fe}} = 7,19 \cdot 10^3$; $\rho_{\text{Ti}} = 4,54 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$.

Під час спікання усадку, яка збільшувалась, розраховували так:

$$l_i = 1 - \frac{V_s}{V_p},$$

де V_s та V_p – об'єм зразка після спікання та пресування, m^3 .

У таблиці подано хімічний склад та основні властивості зразків сплаву систем Ti–Fe–Cr–C та Ti–Fe–Cr–C–B. Склад вихідної шихти розраховували, враховуючи стехіометричні коефіцієнти компонентів, чистоту і насипну густина. Встановили, що на опір зношуванню синтезованих сплавів впливають їхня поруватість, твердість та мікроструктура. За тиску 460 МПа середній розмір зерен $0,7 \dots 1,1 \mu\text{m}$, а середній розмір пор $0,15 \dots 0,2 \mu\text{m}$. При цьому усадка для матеріалів системи Ti–Fe–Cr становить 0,03, а для зразків з додаванням бору – 0,04. Виявили, що зі збільшенням густини усадка та поруватість зменшуються, а отже, знижується коефіцієнт тертя і зростає абразивна зносотривкість, що характерно для більшості порошкових матеріалів.

Поруватість 18...23% отримуємо за повторного циклу теплового пресування або обтискання після спікання. Таку поруватість матеріалу, одержаного СВС, пояснюють неправильною геометричною формою частинок, досить високою їх

твердістю, а також збільшенням усадки. Результати теоретично та експериментально (на просвіт за мікрофотографіями) визначеної поруватості практично збігаються (похибка 0,5...1%).

Властивості сплаву системи Ti-Fe-C-B-Cr

Маса суміші, mass. %	Після пресування			Об'єм після спікання $V_s, \times 10^{-6}, \text{m}^3$	Вихідна поруватість, %	Поруватість після повторного пресування, %	Мікротвердість H_v , МПа	Втрати маси за нежорстко закріпленого абразиву W_1, g	Втрати маси за жорстко закріпленого абразиву W_2, g
	$\rho_n, \times 10^3, \text{kg/m}^3$	$\rho_k, \times 10^3, \text{kg/m}^3$	$V_p, \times 10^{-6}, \text{m}^3$						
50Ti-49Fe-1Cr	4,72	5,75	39,25	38,07	20	18	751	0,133	0,172
45Ti-45Fe-9C-1Cr	3,99	5,06	39,23	38,05	22	21	760	0,132	0,174
40Ti-40Fe-19C-1Cr	3,43	4,45	39,20	38,02	25	23	769	0,131	0,176
40Ti-40Fe-17,5C-1Cr-1,5B	3,41	4,41	39,24	37,67	24	22,5	772	0,121	0,168
40Ti-40Fe-17C-1Cr-2B	3,43	4,39	39,25	37,68	24	22	773	0,121	0,167

Встановили, що після додавання 2 mass.% аморфного бору залишкова поруватість знижується на 1...2%, а після додавання від 9 до 19 mass.% графіту підвищується в 1,2 рази, при цьому надлишок вуглецю утворює фазу, яка у вигляді сітки розміщена на межі перлітних зерен (рис. 1а). Слід зауважити, що поруватість зразків також незначно знижується через звуження пор. Зразки після додавання бору та хрому мають дрібнодисперсну структуру та зафіксовано об'ємний вміст евтектики в структурі синтезованого сплаву (рис. 1б).

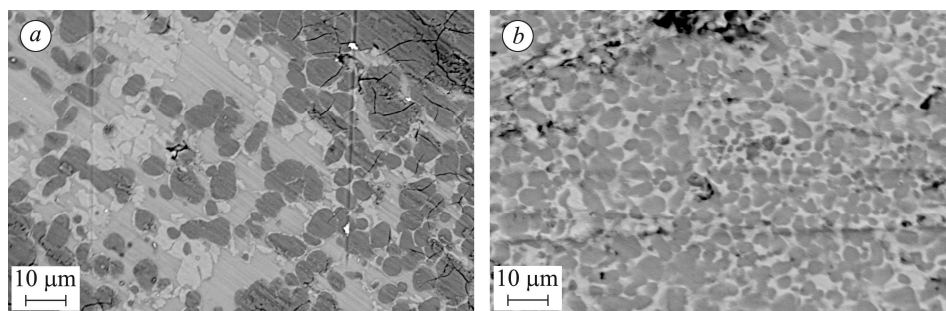


Рис. 1. Структура синтезованих сплавів ($\times 1000$):
а – 45Ti-45Fe-9C-1Cr; б – 40Ti-40Fe-17C-1Cr-2B.

Fig. 1. The structure of alloys after synthesis ($\times 1000$):
а – 45Ti-45Fe-9C-1Cr; б – 40Ti-40Fe-17C-1Cr-2B.

Під час формування структури збільшується розмір зерна. Крім того, знижується температура основних критичних точок та загальна температура спікання суміші, що суттєво пом'якшує вимоги до жорсткості регулювання температури спікання всього матеріалу.

Оскільки бор термодинамічно активний до зародження оксидів, то при 873 К формується борний ангідрид B_2O_3 , який утворює з оксидами заліза і титану борат титану $TiO_2 \cdot B_2O_3$ (при 723 К), борати заліза $FeBO_3$ (при 1090...1010 К) та Fe_3BO_6 (при 1108...1090 К) [5]. Після додавання від 2 до 5 mass.% бору з чистого порошку титану і заліза при 1473 К утворюються бориди заліза Fe_2B , які суттєво підвищують твердість, абразивну зносотривкість, корозійну тривкість і тепло-тривкість сплаву.

Наявність хрому (до 1 mass.%) у відходах сталі ШХ15 та після додавання до шихти сплаву Ti-Fe-Cr-C-B можна пояснити досить малу кількість боридів хрому, які повністю розчиняються і практично не формують мікровиступів. З введенням у шихту Ti-Fe-Cr графіту змінюється фазовий склад; оскільки при 1426 К утворюється евтектика Fe- Fe_3C , то поліпшується твердість сплаву.

Виявили, що матеріали системи Ti-Fe-Cr-C-B за умов жорстко закріпленого абразиву зношуються шляхом росту тріщини вздовж межі зерна зразка та пор (рис. 2). Аналіз засвідчив, що досліджувані сплави за абразивною зносотривкістю переважають сталь 45, зокрема, найвищою володіють сплави системи 40Ti-40Fe-17C-1Cr-2B (рис. 3).

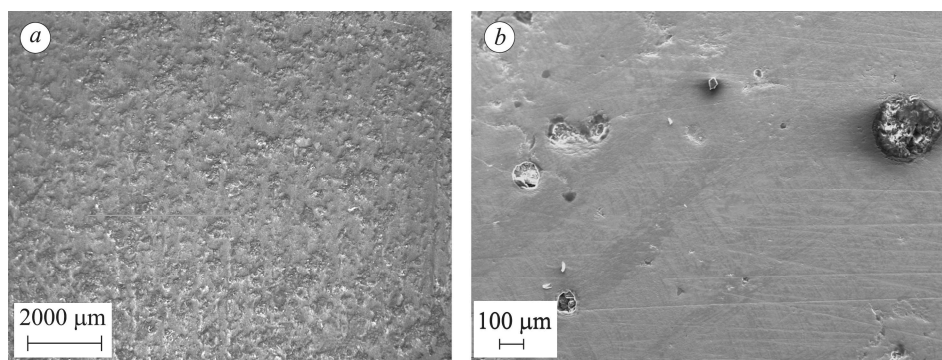


Рис. 2. Мікровиступи, утворені на прошліфованій поверхні сплаву 40Ti-40Fe-17C-1Cr-2B: *a* – $\times 5$; *b* – $\times 50$.

Fig. 2. Micro projections formed on the grinding surface of the 40Ti-40Fe-17C-1Cr-2B alloy : *a* – $\times 5$; *b* – $\times 50$.

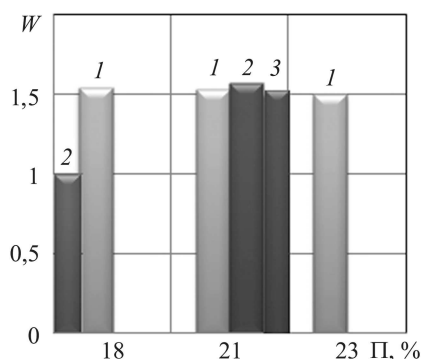


Рис. 3. Залежність відносної абразивної зносотривкості від поруватості. (еталон – сталь 45): 1 – Ti-Fe-C-Cr; 2 – Ti-Fe-C-Cr-B; 3 – сталь 45.

Fig. 3. Dependence of relative abrasive wear resistance on porosity. (standard – steel 45): 1 – Ti-Fe-C-Cr; 2 – Ti-Fe-C-Cr-B; 3 – steel 45.

Розроблений сплав Ti-Fe-C-Cr-B має високі експлуатаційні характеристики, незважаючи на поруватість 22...23%. За результатами досліджень отримали

кореляційні залежності складу шихти сплаву, його структури, поруватості та трибологічних властивостей. Тому синтезовані матеріали з вибраним хімічним складом задовольняють критерій оптимізації трибологічних характеристик для їх ефективної експлуатації.

ВИСНОВКИ

Оптимізацією складу шихти Ti–Fe–Cr додаванням вуглецю (17 mass.%) та бору (2 mass.%) зменшено залишкову поруватість на 1...2% та пом'якшено вимоги до жорсткості регулювання температури спікання всього матеріалу. Найкращу відносну абразивну зносотривкість за умов жорстко закріпленого абразиву та достатню поруватість має сплав 40Ti–40Fe–17C–1Cr–2B.

РЕЗЮМЕ. Приведены результаты исследований влияния состава шихты на относительную абразивную износостойкость материала системы Ti–Fe–C–B–Cr, полученного самораспространяющимся высокотемпературным синтезом. Установлено, что после добавления углерода и бора гетерогенность структуры и износостойкость повышаются. Выявлено, что вследствие формирования оптимального состава шихты и достижения меньшей пористости материала обеспечиваются его наиболее максимальные трибологические характеристики.

SUMMARY. The results of the investigation of the influence of charge on abrasive wear resistance of the Ti–Fe–C–B–Cr material obtained by self-propagating high-temperature synthesis are presented. It was established that the addition 17 mass.% of carbon and 2 mass.% of boron increases the heterogeneity and abrasive wear resistance of the structure. It was shown that porosity has a good influence on abrasive wear resistance of the developed materials. It is shown that the 40Ti–40Fe–17C–1Cr–2B alloy has the highest tribological characteristics due to the optimal composition of the charge.

1. Bernard F. and Gaffet E. Mechanical alloying in SHS research // Int. J. Self-Propagating High-Temperature Synthesis. – 2001. – № 10. – P. 109–132.
2. Borisov A. A., Luca L. De, and Merzhanov A. G. Self-propagating high temperature synthesis of materials. – New York: Taylor and Francis, 2002. – 338 p.
3. Жигуц Ю. Ю., Похмурський В. І. Одержання твердих сплавів із застосуванням металотермії та саморозповсюджувального високотемпературного синтезу // Пр. наук. т-ва ім. Шевченка. – 2003. – Т. 9. – С. 131–137.
4. Антипенко А. М., Бєлас О. М., Войтов В. А. Основи трибології: Підр. – Харків: Харківськ. нац. техн. ун-т сільського господарства ім. Петра Василенка, 2008. – 342 с.
5. Папечко М. І., Богун Л. І. Формування структури поверхневих плівок боридних покриттів під час зношування // Сучасні проблеми трибології: Тези доп. Міжнар. наук. конф., присвяченої 100-річчю від дня народження Б. І. Костецького, Київ, 19–21 травня, 2010. – С. 48.

Одержано 21.11.2014