



МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 620.1:621.762

Онищук О. О., к.т.н. (Східноєвропейський національний університет ім. Лесі Українки, м. Луцьк)

ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ КОМПОНЕНТІВ ДЛЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗУ МАТЕРІАЛІВ ТРИБОТЕХНІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Наведено результати експериментальних і розрахункових досліджень структурних, фізико-механічних і трибологічних властивостей матеріалів триботехнічного призначення, отриманих високотемпературним синтезом. Подано приклади діаграм розсіювання та графіки поверхонь для матеріалів вибраної системи. Показано доцільність та зручність методу найменших квадратів в програмі STATISTICA для оцінки властивостей багатокомпонентних матеріалів. Встановлено, що після додавання хрому і бору зростають гетерогенність структури і зносостійкість, твердість матеріалів триботехнічного призначення на основі заліза, титану, вуглецю.

Ключові слова: високотемпературний синтез, матеріали для триботехнічного призначення, трибологічні властивості, Ti-Fe-Cr-CB системи, втрата ваги, міцність, модуль Юнга, бор, хром.

Вступ. Світова тенденція прямує до постійного розвитку технологій, які використовують порошкові матеріали. З іншої сторони серед переліку проблем машинобудівного комплексу України, важливим є підвищення надійності й довговічності деталей машин, які працюють в умовах тертя. Матеріали триботехнічного призначення мають переваги при роботі в умовах підвищених навантажень і температур, інтенсивного зносу й агресивних середовищ [1; 2].

Сучасними дослідженнями в області тертя і зносу показано, що матеріали триботехнічного призначення повинні забезпечувати умови динамічної рівноваги, тобто одночасно бути як сумісними та виявляти структурну пристосованість та забезпечувати надійну роботу трибоспряжень [3].

На даному етапі розвитку техніки пред'являються підвищені вимоги до якості, надійності та довговічності деталей і машин. Значно ускладнились умови експлуатації техніки, де ряд вузлів працюють під впливом одночасно декількох факторів: великих питомих наван-

тажень, підвищених температур, впливу різноманітних середовищ. Тому на сьогоднішній день гостро стоїть проблема підвищення якості існуючих і створення нових матеріалів та покриттів, які б відповідали підвищеним вимогам до зносостійкості, конструкційної міцності, корозійної стійкості [5].

Застосування порошкових композиційних матеріалів з високими зносостійкими властивостями обмежене при експлуатації зі значними питомими навантаженнями при підвищених температурах, що пояснюється їх недостатньою конструкційною міцністю [3; 4; 5]. Тому отримання нових експериментальних даних, розробка нових методів для їх реалізації з метою збільшення продуктивності і ефективності технологічного процесу, зниження собівартості, підвищення якості продукції, а також розробка нових видів матеріалів є актуальною науково-технічною проблемою. Тому розробка нових технологій є пріоритетною для створення високоефективних та енергозберігаючих виробництв. Вирішення цієї складної проблеми неможливе без проведення комплексу теоретичних та експериментальних досліджень, фізичного та математичного моделювання процесів.

Аналіз робіт присвячених дослідженням триботехнічних властивостей матеріалів, отриманих високотемпературним методом, показав, що найбільше промислове застосування для захисту вузлів тертя від зносу одержали матеріали систем Ti-Fe-Cr-C-B [3; 4]. Галузь їх застосування постійно розширюється через властивості, які притаманні лише матеріалам триботехнічного призначення – можливості варіювання вихідних компонентів, що поєднуються високотемпературним синтезом у порівнянні з матеріалами, отриманими традиційним способом [5]. Одним з перспективних матеріалів для отримання матеріалів з хорошими триботехнічними властивостями є титан, бор, залізо.

Постановка задачі. Мета даної роботи – дослідження закономірностей впливу складу на функціональні властивості матеріалів триботехнічного призначення, отриманого СВС на основі систем TiFe-Cr-xC та TiFe-Cr-xC-yB, в залежності від умов експлуатації, а також отримання такого, який б забезпечував оптимальні властивості міцності, твердості та зносостійкості.

Матеріали та методи. Використовували методику розрахунку складу вихідної шихти з урахуванням стехіометричних коефіцієнтів компонентів, чистоти і насипної густини. Визначили такий хімічний склад шихти зразків: склад № 1 – матриця системи TiFe-Cr-xC; склад № 2 – матриця системи TiFe-Cr-xC-yB. Зразки змішували, засипали у форму та пресували одностороннім холодним способом під тиском 270...460 МПа, а вихідну шихту – пресом ПСУ-250 з площею поверхні 0,012 м². Далі спресовані зразки подавали в реактор для високоте-



мпературного синтезу. Контролювали хімічний склад матеріалу безпосередньо на заготовках, використовуючи дифракційний стилоскоп СЛ-13 [6; 7].

Електронно-мікроскопічні дослідження виконували за допомогою сканівного електронного мікроскопа ZEISS EVO 40XVP зі системою рентгенівського мікроаналізу INCA Energy та електронного МИМ-10. Структурні характеристики, хімічний аналіз на вміст кисню, твердість за Віккерсом визначали згідно з ГОСТ 20018-74, ГОСТ 8505-84 та ГОСТ 20017-74 відповідно. Характеристики міцності композиту встановлювали за стандартами 7668-82 і 14759-69 на випробувальній машині MI40KY. Абразивне зношування за випробувань нежорстко закріпленим абразивом виконували за ГОСТ 23.208-79. У зону контакту гумового круга і зразка дозувальним пристроєм безперервно подавали абразив. Режим тертя такий: навантаження $P = 2,5 \text{ N}$, швидкість обертання диска $v = 0,33 \text{ m/s}$, частота обертання $n = 2,08 \text{ rot/s}$, абразив – пісок (вологість не перевищувала 0,16%), розмір зерен абразиву $0,2 \dots 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ час випробування 30 min. Пружні та непружні властивості зразків визначали динамічним методом за частотою їх власних поперечних коливань. Результати вимірювань міцності, твердості та модуля Юнга статистично обробляли методом найменших квадратів, а також з допомогою програм STATISTICA.

Результати та їх обговорення. В таблиці наведено хімічний склад шести зразків з матеріалів систем Ti-Fe-Cr-C та Ti-Fe-Cr-C-B, де змінні кількість Ti, Fe, C, Cr, B; твердість, міцність, модуль Юнга та втрата маси. Структуру отриманих зразків ілюструє рис. 1.

Таблиця

Характеристика та структура зразків трибо технічних матеріалів

	Система	Вміст елементів, mass. %					Твердість $HV_{0,3}$	Границя міцності на стиск, σ GPa	Модуль Юнга E , GPa	Втра-ти маси, W_g	По-рис-тість, %
		Ti	C	Fe	Cr	B					
1	Ti-Fe-Cr-C	50	–	49	1	–	900	$3,05 \pm 0,88$	330	0,1725	17,9
2		45	10	44	1	–	878	$3,25 \pm 0,93$	325	0,1735	21
3		40	20	39	1	–	865	$3,3 \pm 0,98$	320	0,1772	23
4		35	30	34	1	–	832	$3,15 \pm 0,98$	315	0,1763	29
5	Ti-Fe-Cr-C-B	40	19,5	39	1	1,5	772	$3,33 \pm 0,91$	323	0,1678	22,5
6		40	18	39	1	2,0	873	$3,33 \pm 0,91$	323	0,1676	22,3

Результати аналізу основних фізико-механічних і трибологічних властивостей цих систем після високотемпературного синтезу засвідчили, що внаслідок додавання до системи TiFe-Cr-xC 2 mass. %

бору та 1 mass. % хрому суттєво змінюються не лише фізико-механічні властивості, але й вдається отримати гетерогенну структуру інтерметаліду (рис. 1, с, d). Крім того, структури 40Ti–39Fe–19,5C–1Cr–1,5B та 40Ti–39Fe–18C–1Cr–2B містять борати та борний ангідрид B_2O_3 , які володіють задовільними трибологічними властивостями [6].

Щоб отримати експериментальні результати про фізико-хімічні та трибологічні властивості матеріалів, використали методи парної та множинної кореляції [7; 8]. За діаграмами розсіювання отримали коефіцієнти кореляції Пірсона: $r = -0,0174, r = 0,0996$ (рис. 2). Кореляційні залежності візуалізували за допомогою діаграм двовимірного розсіювання та встановили зв'язок між двома змінними (наприклад, твердістю та міцністю бору та модулем Юнга). Зокрема, зв'язок між твердістю і міцністю описують рівняння лінійної регресії: $y = (r = -0,1738) = 3,5514 - 0,0003x$, тобто зі зростанням твердості міцність дещо зменшується (рис. 2, а); залежність між втратами маси і модулем Юнга – рівняння $y = (r = 0,0996) = 0,1546 + 0,0000062x$, тобто зі зростанням модуля Юнга (жорсткості матеріалу) збільшуються втрати маси (рис. 2b); залежність твердості від вмісту бору – рівняння $y = (r = 0,2882) = 781,3567 + 29,2667x$, де з підвищенням вмісту бору твердість зростає (рис. 2c); зв'язок між втратами маси і вмістом бору – рівняння $y = (r = -0,2109) = 0,175187 - 0,0014x$, тобто зі зростанням вмісту бору втрати маси зменшуються (рис. 2, d).

Найбільший коефіцієнт множинної кореляції $r = 0,2882$ виявився для зв'язку твердості та вмісту бору; найменший – $r = 0,2109$ – для зв'язку втрат маси та вмісту бору, що свідчить про те, що з додаванням 2 mass.% аморфного бору та 1 mass. % хрому суттєво підвищуються твердість та зносостійкість матеріалу.

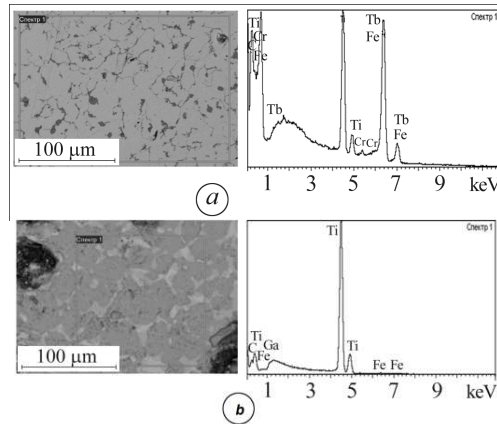


Рис. 1. Структура матеріалів триботехнічного призначення:
а – 50Ti-49Fe-1Cr; б – 40Ti-39Fe-18C-1Cr-2B

Для визначення зв'язку між трьома змінними складаємо математичні рівняння для залежності твердість $HV_{0,3}$ – міцність σ – модуль Юнга E ; модуль Юнга E – міцність σ – втрати маси W ; твердість $HV_{0,3}$ – вміст бору C_B – міцність σ ; вміст бору C_B – міцність σ – модуль Юнга E . Для пошуку їх оптимального використаємо метод найменших квадратів.

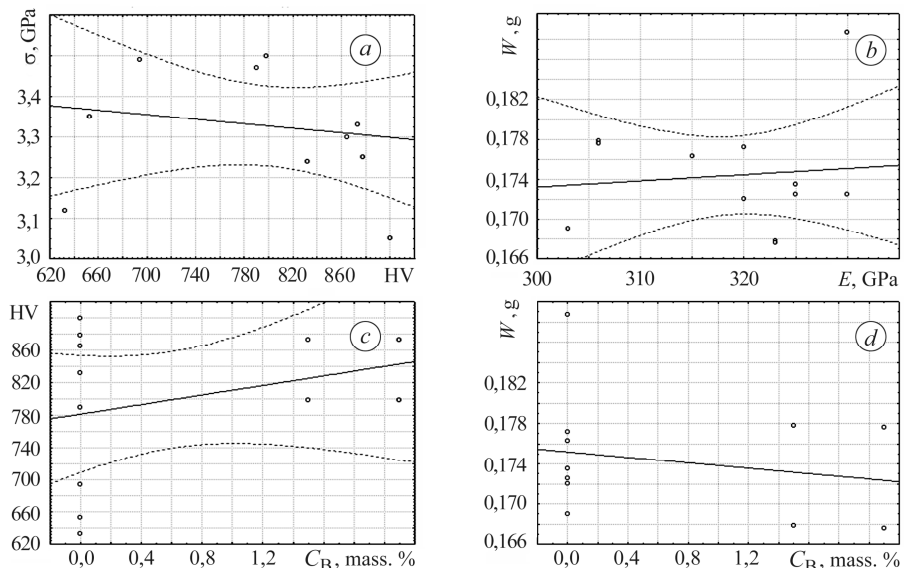


Рис. 2. Діаграма розсіювання для триботехнічного матеріалу складу № 1 та 2 за змінними: а) – міцність σ – твердість $HV_{0,3}$; б) – втрати маси W – модуль Юнга E ; с) – твердість $HV_{0,3}$ – вміст бору C_B ; д) – втрати маси W – вміст бору C_B

Запишемо рівняння, яке описує зв'язок між функцією y та властивостями розроблених триботехнічних матеріалів:

$$y_i = f(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}, a_1, a_2, \dots, a_m) + \theta_i, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

де x_i – твердість, міцність, вміст бору, модуль Юнга та зносостійкість в i -му досліді; y_i – задана функція в i -му досліді; θ_i – випадкова величина з нульовим математичним сподіванням, взята зі знаком відхилення y_i від відповідного значення функції регресії.

Це рівняння спрощуємо до рівнянь з трьома змінними:

$$\begin{aligned} y &= f(\sigma, HV_{0,3}, E) + \theta_i, \\ y &= f(HV_{0,3}, C_B, \sigma) + \theta_i, \\ y &= f(\sigma, P, W) + \theta_i, \\ y &= f(E, \sigma, W) + \theta_i, \\ y &= f(C_B, \sigma, E) + \theta_i, \end{aligned} \quad (2)$$

де $i = 1 \dots 6$; σ – міцність в i -му досліді, GPa; $HV_{0,3}$ – твердість за Віккерсом в i -му досліді, MПа; E – модуль Юнга в i -му досліді, GPa; W – втрати маси (зносостійкість) в i -му досліді, g; C_B – вміст бору в i -му досліді, mass %, P – пористість в i -му досліді, %.

Пористість триботехнічного матеріалу також значно впливає на зносостійкість. Із зменшенням пористості зносостійкість триботехнічного матеріалу зростає. Результати дослідження отриманих триботехнічних матеріалів 40Ti–39Fe–19,5C–1Cr–1,5B та 40Ti–39Fe–18C–1Cr–2B свідчать про їх високі експлуатаційні характеристики; навіть незважаючи на наявність деякої залишкової пористості (5÷7%). Досягнення таких значень пористості вимагає застосування повторного циклу теплового пресування або обтискання після спікання. Додавання 2 mass. % аморфного бору та 1 mass. % хрому дозволяє знизити залишкову пористість на 1-2%, зменшити втрати маси на 8-10% та утворює більш дисперсну структуру.

За згладженою поверхнею, використовуючи отримані дані, можна встановити залежність між трьома змінними. Ділянка, де показники твердості, міцності, модуля Юнга пористості та втрат маси найвищі, лежить між трьома змінними, в зоні темнішого кольору (рис. 3, рис. 4).

За поданими графіками (рис. 4) можна спростити розв'язки рівняння (3) та вибрати оптимальний склад компонентів системи Ti–Fe–C–Cr–B за найменшої кількості експериментів.

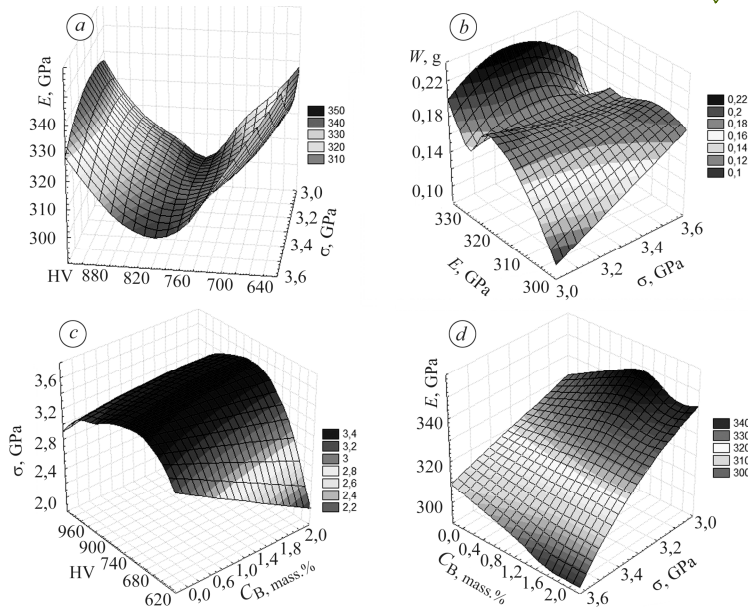


Рис. 3. Графіки поверхонь матеріалу складу № 1 та 2: а – твердість $HV_{0,3}$ – міцність σ – модуль Юнга E ; б – модуль Юнга E – міцність σ – втрати маси W ; в – твердість $HV_{0,3}$ – вміст бору C_B – міцність σ ; д – вміст бору C_B – міцність σ – модуль Юнга E

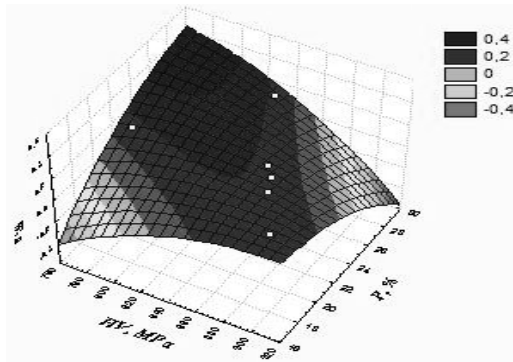


Рис. 4. Графік поверхні для матеріалу складу № 2: твердість $HV_{0,3}$ – втрати маси W – пористість P

Для визначення зв'язку між трьома змінними складемо математичне рівняння для залежностей твердість $HV_{0,3}$ – пористість P – втрати маси W . Для розв'язку цього рівняння використаємо метод найменших квадратів.

Запишемо рівняння, яке описує зв'язок між втратами маси (зносоустійкість) та твердістю і пористістю розроблених триботехніч-

них матеріалів:

$$Z_i = 0,056x_i + 0,7428y_i - 2,4795,$$

де x_i – твердість в i -му досліді, HV0,3, у.; y_i – пористість в i -му досліді, %; z_i – втрати маси в i -му досліді, г; θ_i – випадкова величина з нульовим математичним сподіванням, взята зі знаком відхилення z_i від відповідного значення функції регресії.

Отже, такий метод підгонки поверхні доцільний, щоб знайти нелінійні залежності між отриманими експериментально фізико-механічними і трибологічними показниками зразків триботехнічних матеріалів.

Як бачимо, найкращим комплексом властивостей володіють системи Ti–Fe–C–Cr–B з вмістом 1,5–2 mass. % бору та 1 mass. % хрому (склад № 5 та 6). Крім того, системи, леговані бором та хромом, мають вищі границю міцності на стиск та модуль Юнга. Оптимальним комплексом фізико-механічних та трибологічних властивостей володіють зразки 40Ti–39Fe–19,5C–1Cr–1,5B та 40Ti–39Fe–18C–1Cr–2B (рис. 3, с, d). Трибологічними випробуваннями виявили дещо менші втрати маси (ваговий знос) зразка 40Ti–39Fe–18C–1Cr–2B, ніж зразків без додавання аморфного бору. Це зумовлено формуванням на поверхні тертя боридів, які утворюють плівки борного ангідриду, через що втрати маси зменшуються. Таким чином, встановлено кореляційну залежність між складом шихти, фізико-механічними і трибологічними властивостями триботехнічних матеріалів. За поданими графіками (рис. 3, рис. 4) можна розв'язати рівняння (1) та вибрати оптимальний склад компонентів системи Ti–Fe–C–Cr–B за найменшої кількості експериментів.

Висновки

Встановлено, що від оптимального масового співвідношення вмісту компонентів суттєво залежать фізико-механічні та трибологічні властивості матеріалів триботехнічного призначення після високотемпературного синтезу, а з додаванням 1 mass. % хрому та ~2 mass.% бору змінюються модуль Юнга та зносостійкість.

Під час дослідження закономірностей впливу на ці властивості матеріалів системи Ti–Fe–C–Cr–B складу шихти використано методику найменших квадратів та пакет програм STATISTICA, що дало можливість значно зменшити кількість експериментів.

Графічно підтверджено, що оптимальними характеристиками володіють зразки з матеріалів 40Ti–39Fe–19,5C–1Cr–1,5B та 40Ti–39Fe–18C–1Cr–2B з додаванням 1 mass. % та до 2 mass. % аморфно-



го бору. Дослідно-промислова перевірка виявила, що після високо-температурного синтезу вони забезпечують надійну експлуатацію деталей в умовах високих температур та абразивного тертя.

Крім того, метод найменших квадратів в програмі STATISTICA допоміг корелювати структуру для побудови кількісних моделей досліджуваної властивості. Побудова діаграм розсіювання та графіків поверхонь по середніх значеннях для твердості, міцності, модуля Юнга та зносу системи Ti-Fe-Cr-C-B дає можливість здійснити вибір оптимального складу компонентів (% мас.) системи Ti-C-Fe-B з найкращим комплексом фізико-механічних і трибологічних характеристик.

Проведене дослідження показало важливість і необхідність проведення аналізу отриманих трибологічних і фізико-механічних досліджень розроблених матеріалів. Було встановлено, що % мас. B впливає на зносостійкість, отримано графічне та чисельне вираження цієї залежності. Проведене планування експерименту дало можливість виявити фактори, які впливають на міцність, твердість і зносостійкість та розробити шляхи для покращення цих властивостей шляхом додавання в суміш більше 2 % мас. аморфного бору та хрому. З допомогою пакету програм STATISTICA, використовуючи лінійну та квадратичну моделі аналізу експерименту та побудовані графіки поверхонь, можна отримати не лише залежність компонентів системи Ti-C-Fe-Cr-B та їх взаємодій на фізико-механічні і трибологічні властивості, але й описати особливості формування структурних та механічних властивостей багатокомпонентних композиційних матеріалів.

Перспективним напрямом вирішення проблем, пов'язаних з підвищенням зносостійкості, є застосування композиційних матеріалів триботехнічного призначення, що вимагає розвитку та освоєння технологій їх отримання, а також методів забезпечення оптимального комплексу механічних і технологічних властивостей даних матеріалів для різноманітних умов експлуатації. При розробці матеріалів за допомогою самопоширюючого високотемпературного синтезу виникне можливість регулювання міцності, жорсткості, зносостійкості, діапазону робочих тисків, температур та інших механічних і експлуатаційних властивостей шляхом підбору складу, зміни співвідношення.

1. Bernard F. and Gaffet E. Mechanical alloying in SHS research // Int. J. Self-Propagating High-Temperature Synthesis. – 2001. – № 10. – P. 109–132.
2. Чернець М. Поверхневе зміцнення конструкційних матеріалів трибосистем ковзання / Чернець М., Пашечко М., Невчас А. – Дрогобич : Коло, 2001.

– 512 с. **3.** Дмитриченко М. Ф. Триботехніка та основи надійності машин : навч. пос. / Дмитриченко М. Ф., Мнацаканов Р. Г., Мікосянчик О. О. – К. : Інформавтодор, 2006. – 216 с. **4.** Жигуц Ю. Ю. Методика розрахунку складу екзотермічних шихт на основі термохімічного аналізу / Жигуц Ю. Ю., Широков В. М. // Машинознавство. – 2005. – № 4. – С. 48–50. **5.** Трибология и надежность // Сб. науч. трудов; под ред. проф. К.Н. Войнова. – СПб. : НИУ ИТМО, 2013. – 266 с. **6.** Onyshchuk O. O. and Rud' V. D. Structures and tribological characteristics of TiFe-xC triboengineering materials obtained by self-propagating high-temperature synthesis // Materials Science. – 2013. – 49, № 3. – P. 418–424.) **7.** Stelmakh L. S., Zhilyaeva N. N. and Stolin A. M. Mathematical modeling of thermal regimes of SHS compaction // J. Eng.-Physics. – 1992. – 63, № 5. – P. 623–629. **8.** Боровиков В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере. – СПб. : Питер, 2003. – 688 с.

Рецензент: Кормош Ж. О. (Східноєвропейський національний університет ім. Лесі Українки)

Onyshchuk O. O., Candidate of Engineering (PH.D.) (Lesya Ukrainka Eastern European National University, Lutsk)

OPTIMIZATION OF COMPONENTS FOR HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS OF TRIBOTECHNICAL APPLICATION MATERIALS

The results of experimental and computational studies of structural, physicomechanical and tribological properties of tribotechnical materials obtained by high-temperature synthesis are presented. Examples of scatter diagrams and surface graphs for materials of the selected system are given. The expediency and convenience of the least squares method in the STATISTICA game is shown for evaluation of the properties of multicomponent materials. It was established that after adding chromium and boron, heterogeneity of structure and wear resistance, hardness of materials of tribotechnical appointment on the basis of iron, titanium, and carbon are increasing.

Keywords: high-temperature synthesis, materials for tribotechnical purposes, tribological properties, Ti-Fe-Cr-SV systems, weight loss, durability, Young's modulus, boron, chromium.



Онищук О. А., к.т.н. (Восточноевропейский национальный университет им. Леси Украинки, г. Луцк)

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА КОМПОНЕНТОВ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА МАТЕРИАЛОВ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Приведены результаты экспериментальных и расчетных исследований структурных, физико-механических и трибологических свойств материалов триботехнического назначения, полученных высокотемпературным синтезом. Даны примеры диаграмм рассеяния и графики поверхностей для материалов выбранной системы. Показана целесообразность и удобство метода наименьших квадратов в программе STATISTICA для оценки свойств многокомпонентных материалов. Установлено, что после добавления хрома и бора растут гетерогенность структуры и износостойкость, твердость материалов триботехнического назначения на основе железа, титана, углерода.

Ключевые слова: высокотемпературный синтез, материалы для триботехнического назначения, трибологических свойства, Ti-Fe-Cr-CB системы, потеря веса, прочность, модуль Юнга, бор, хром.
