

УДК 620.169:621.793

ОЦІНКА ЗНОСОТРИВКОСТІ ЕВТЕКТИЧНИХ ПОКРИВІВ СИСТЕМИ Fe–Mn–C–B, ЛЕГОВАНИХ Si, Ni і Cr, З ВИКОРИСТАННЯМ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

М. І. ПАШЕЧКО, Ю. МОНТУСЄВИЧ

Люблінський політехнічний інститут, Польща

Проаналізовано будову і склад евтектичних композиційних дисперсійно зміцнених матеріалів системи Fe–Mn–C–B, легованих Si, Ni і Cr. Подано багатокритеріальну оцінку вибору матеріалу, який характеризується найвищою зносотривкістю за різних умов тертя і з різними контртілами. Оцінено розроблені матеріали типу ПМІ-12... ПМІ-15, а також порівняльні матеріали системи Ni–Cr–B–Si, ПГ–СРЗ, ПГ–10Н–01, що серійно виробляють, і які відомі багато років на світовому ринку. Для аналізу використано метод визначення компромісних розв'язків, а також метод поділу невизначеності, які входять до складу еволюційної системи багатокритеріального аналізу.

Ключові слова: зносотривкість, евтектичні покриття, багатокритеріальний аналіз.

Розробка нових матеріалів – один з головних напрямків досліджень, який дає змогу підвищити зносотривкість конструкційних елементів, що зношуються. Це може стосуватись як цілого матеріалу, так і його поверхневих шарів [1–6]. На матеріали, які використовують для виготовлення вузлів тертя і працюють в умовах зношування (головно абразивного), необхідно сучасними методами наносити спеціальні поверхневі шари [1, 2, 4–6]. Перспективні є поверхневі евтектичні покриття, які характеризуються великою твердістю та зносотривкістю [1–3, 6].

Після розроблення матеріалів і дослідження їх зносотривкості необхідно, зазвичай, вибрати матеріал з найкращими експлуатаційними властивостями у заданих умовах експлуатації [7, 8]. Для цього використано методи, які входять до складу еволюційної системи багатокритеріального аналізу [9–12].

Евтектичні сплави системи Fe–Mn–C–B. Отримання евтектичних сплавів на основі квазітернарної системи Fe–Mn–C–B [1] дає змогу вибрати матеріали з відповідним вмістом легувальних елементів, наприклад Si; Ni; Cr; W; V; Al; Ti; V та ін., як складових, що забезпечують відповідні властивості, необхідні під час проектування відповідної пари тертя. Розроблені евтектичні сплави – це композиційні багатофазові дисперсійно зміцнені матеріали із градієнтом структури.

Структура сплавів системи Fe–Mn–C–B складається з евтектики типу легований перліт (м'яка фаза–основа)–марганцевистий карбід заліза $Fe_{0,4}Mn_{3,6}C$ (зміцнювальна фаза–каркас). Дисперсійне зміцнення сплаву відбувається, зазвичай, карбідом хрому Cr_7C_3 та боридом заліза Fe_2B [1].

Встановлено необхідний вміст заліза, марганцю, вуглецю і бору для одержання евтектичних сплавів системи Fe–Mn–C–B. Вміст легувальних елементів Si, Ni та Cr обмежено, щоб отримати сплави з евтектичною структурою та заданими фізико-механічними властивостями поверхневих шарів (табл. 1).

Базову систему легували кремнієм, хромом та нікелем для одержання зносостійких корозійнотривких сплавів та покриттів.

Контактна особа: М. І. ПАШЕЧКО, e-mail: mpashechko@hotmail.com

Необхідно зазначити, що структура та фазовий склад всіх досліджених сплавів і покривів відповідає структурі та фазовому складу порошкових матеріалів, з яких вони отримані.

Таблиця 1. Хімічний склад евтектичних порошкових сплавів (mass.%)

Марка порошкового сплаву	Fe, C, B	Mn	Si	Ni	Cr	S	P
ПМІ-12	Решта	11,37	2,48	–	18,22	0,09	0,028
ПМІ-13	Решта	9,82	3,36	–	10,0	0,09	0,022
ПМІ-14	Решта	12,0	4,4	11,63	11,96	0,01	0,03
ПМІ-15	Решта	8,7	4,1	19,58	–	0,09	0,028

Сплави у вигляді порошкових матеріалів, дротів та електродів виготовляють на Торезькому заводі наплавлювальних твердих сплавів, НВП “Тулачермет” (Росія), Інституті зварювання в Глівіцах, фірмі WOLCO (Польща) та ін.

Дослідження зносотривкості розроблених евтектичних сплавів. Вивчали на модернізованій та комп’ютеризованій машині тертя МІ-1М типу Амслера в умовах тертя без мащення впродовж 8 h. Зразки $\varnothing 10$ mm виготовляли зі сталі 45 і наносили методом плазмового наплавлення на торець евтектичні покриви, використовуючи порошкові матеріали, які дають можливість формувати сплави з евтектичною структурою. Досліджували зносотривкість за схемою тертя стержень–диск. Як стержень використовували три зразки $\varnothing 10$ mm і висотою 10 mm, а як контртіло – сталь 45 $\varnothing 90$ mm і товщиною 10 mm, яку піддавали загартуванню і низькому відпуску (52...54 HRC). Питоме навантаження: 3; 7; 10 МПа, швидкість тертя ковзання 0,4; 0,6; 0,8 m/s, шлях тертя $L = v \cdot t = 1675$ m; поверхня тертя $S = 2,5 \cdot 10^{-4}$ m². Навантаження здійснювали, використовуючи важіль. За допомогою установки Surtronik 3+ встановили, що шорсткість поверхні тертя після зношування становить ~ 1 μ m.

Результати проведених експериментальних досліджень евтектичних композитів на основі системи Fe–Mn–C–B в умовах абразивно-оливного тертя показали, що кінетика їх зношування описується трибокінетичною моделлю, запропонованою В. В. Панасюком, О. Є. Андрейківим та М. В. Чернецем [13]. Закономірностями зношування матеріалів під час сухого тертя [14, 15] та особливостями трибоконтактного руйнування покривів, на основі гіпотези про функціональний взаємозв’язок зношування і питомих сил тертя можна дослідити їх кінетику, використовуючи систему кінетичних рівнянь [13]

$$\frac{1}{v} \cdot \frac{dI_k}{dt} = \Phi_k^{-1}(\tau), \quad (1)$$

де I_k – лінійне зношування (m); v – швидкість ковзання (m/s); t – час тертя (s); $k = 1, 2$ – нумерація елементів, що зношуються; $\tau = \mu \cdot p$ – питома сила тертя; μ – коефіцієнт тертя ковзання; p – контактний тиск (МПа); $\Phi(\tau)$ – характеристична функція зносотривкості матеріалів у вибраній трибологічній парі.

Запропонована модель передбачає тертя двох тіл ($k = 1; 2$).

Характеристичну функцію зносотривкості матеріалів $\Phi(\tau)$ визначають на основі експериментальних результатів за формулою

$$\Phi_k^{(j)}(\tau) = L / I_j, \quad (2)$$

де j – дискретні значення питомої сили тертя τ .

Зношування I_j визначають за втратою маси зразка ΔM_j , поверхнею тертя S , шляхом тертя L і густиною матеріалу зразка ρ :

$$I_j(L) = \frac{\Delta M_j}{S \cdot \rho} \quad (3)$$

Таблиця 2. Характеристики зношування евтектичних покриттів у парі тертя зі сталлю 45

Матеріал	Тертя			
	в оливі		в оливі з піском	
	Характеристики зношування			
	$B \cdot 10^8$	m	$B \cdot 10^8$	m
ПМІ-12	3,32	0,85	2,52	0,63
ПМІ-13	14,2	0,9	4,48	0,6
ПМІ-14	26,7	1,17	6,17	0,57
ПМІ-15	2,32	0,8	1,7	0,65
ПГ-СРЗ	3,32	0,85	2,52	0,63
ПГ-10Н-01	6,5	0,82	3,36	0,68
Сталь 45	29,9	1,2	31,7	0,52

Для апроксимації функції зношування $\Phi_k^{(j)}(\tau)$ матеріалів використовують таку залежність:

$$\Phi_k(\tau) = \frac{B_k \left(\tau_k^{(0)}\right)^{m_k}}{\left(\tau - \tau_k^{(0)}\right)^{m_k}}, \quad (4)$$

де B_k , m_k , τ – характеристики зношування матеріалів для даної пари тертя; $\tau_k^{(0)}$ – значення τ , за яких матеріали пари тертя не зношуються.

Характеристики зношування B і m для кожної пари тертя, визначені методом найменших квадратів з використанням експериментальних значень $\Phi(\tau)$ – τ , подані в табл. 2.

З використанням співвідношення (4), побудовані діаграми зносотривкості евтектичних покриттів під час зношування в різних середовищах. Як приклад, наведена (рис. 1) діаграма зносотривкості евтектичного покриття системи Fe–Mn–C–B під час зношування в абразивно-оливному середовищі за тертя по борованій вкладці зі сталі 45.

З використанням співвідношення (4), побудовані діаграми зносотривкості евтектичних покриттів під час зношування в різних середовищах. Як приклад, наведена (рис. 1) діаграма зносотривкості евтектичного покриття системи Fe–Mn–C–B під час зношування в абразивно-оливному середовищі за тертя по борованій вкладці зі сталі 45.

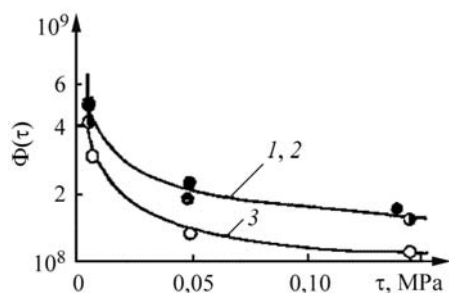


Рис. 1. Діаграма зносотривкості евтектичного покриття системи Fe–Mn–C–B під час зношування в абразивно-оливному середовищі за тертя по борованій вкладці зі сталі 45: 1 – 0,4 м/с; 2 – 0,6 м/с; 3 – 0,8 м/с; шлях тертя $L = v \cdot t = 1675$ м; $S = 2,5 \cdot 10^{-4}$ м².

Fig. 1. A diagram of wear resistance of eutectic Fe–Mn–C–B coating under wear in abrasive oily environment in friction over a boronized steel 45 insert: 1 – 0.4 m/s; 2 – 0.6 m/s; 3 – 0.8 m/s; friction path of $L = v \cdot t = 1675$ m; $S = 2.5 \cdot 10^{-4}$ m².

Багатокритеріальна оцінка евтектичних сплавів. Методи багатокритеріального аналізу. Для багатокритеріальної оцінки результатів випробувань на зношування нових евтектичних матеріалів використано методи, які утворюють еволюційну систему багатокритеріального аналізу [9]. На першому етапі дослідів шукають оптимальні розв'язки за Парето (в критеріальному просторі розв'язки не виключають один одного). Далі, використовуючи метод визначення компромісних

розв'язків (МВКР) [9, 11, 12], генерують компромісні рішення. Для точності вимірювань під час досліджень перевіряють також, чи аналізовані результати не відрізняються у межах вимірювальної похибки. Для цього використано метод інтервалу невизначеності (МІН) [9, 10]. Він виключає один із двох розглядуваних розв'язків за багатокритеріальним аналізом, в якому виконується умова (5) (рис. 2а).

Рис. 2. Візуалізація умови (5) за двокритеріальної мінімізації, коли x^\wedge і x^+ неоптимальні (а) та оптимальні (б) елементи за інтервалом невизначеності.

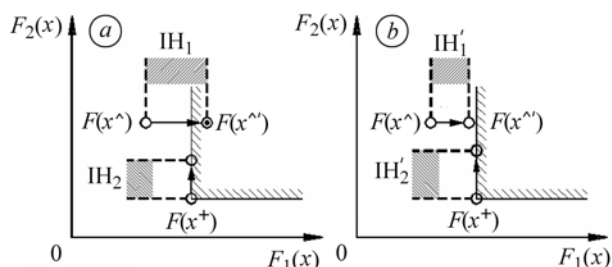


Fig. 2. Visualisation of condition (5) for bicriterial minimisation, when x^\wedge and x^+ are nonoptimal (a) and optimal (b) elements by a non-differentiation interval.

Метод інтервалу невизначеності реалізує сформульовану оптимальність за інтервалу невизначеності, базується на змодифікованій ідеї мутації і уможливорює виключення розв'язків, значення яких знаходяться досить близько [9, 10, 12]. Селекція застосована для вибору оптимальних розв'язків. Метод дає змогу встановити, чи рішення, змінене (“погіршене”) через прийнятий інтервал невизначеності (ІН), залишається надалі оптимальним розв'язком. За мінімізації критеріїв, елемент $x^\wedge \in \Omega$ буде оптимальним за інтервалом невизначеності тоді і лише тоді, коли у вибраних оптимальних розв'язках за Парето Ω не буде такого елемента x^+ , що для кожного $l \in N$:

$$\text{коли } F_l(x^\wedge) \geq 0: F_l(x^\wedge) < F_l(x^+), \text{ то } (1 + \text{ІН}_l) F_l(x^\wedge) > F_l(x^+); \quad (5)$$

$$\text{коли } F_l(x^\wedge) < 0: F_l(x^\wedge) < F_l(x^+), \text{ то } (1 - \text{ІН}_l) F_l(x^\wedge) > F_l(x^+).$$

Показано (рис. 2а), що елемент x^\wedge виключається, оскільки після його оцінки значення, яке виникає з прийнятого інтервалу невизначеності ІН_1 , потрапляє всередину домінувального конуса з вершиною, що знаходиться в точці $F(x^+)$. На рис. 2б – обидва елементи x^\wedge , а також x^+ оптимальні за інтервалом невизначеності.

У запропонованому методі інтервал невизначеності подано у відсотках вартості аналізованого критерію і він відповідає вимірювальній точності аналізованої величини.

Метод визначення компромісних розв'язків ґрунтується на розв'язку, який був би найкращий, але фізично нездійсненний. З цією метою визначаємо ідеальний вектор $F^0 = [F_1^0, F_2^0, \dots, F_j^0]^T$ в аналізованому скінченному наборі оптимальних розв'язків, які не виключають один одного. Коли всі складові вектора критеріїв $F = [F_1, F_2, \dots, F_j]^T$ мінімізуються, ідеальний вектор $F^0 = [F_1^0, F_2^0, \dots, F_j^0]^T$ встановлюють шляхом пошуку мінімуму для кожного критерію оцінки:

$$F_j^0(x) = \min_{n \in N} F_j^n(x), \quad (6)$$

де $F_j(x)$ – j -та складова вектора розглядуваних критеріїв; $n = \{1, 2, \dots, N\}$ – індекси розв'язків, оптимальних за Парето.

Для компромісних розв'язків у просторі аналізованих критеріїв використано метод min–max з вагами та врахуванням норми Чебишева ($\|r\| \rightarrow +\infty$), а також відхилення вимірювань відносно ідеального вектора, що дає можливість порівнювати різні значення

$$p[F(x)] = \min_{n \in N} \max_{j \in J} \left\{ \omega_j \frac{|F_j^0(x) - F_j^n(x)|}{|F_j^0(x)|} \right\}, \quad (7)$$

де ω_j – вага j -го критерію оцінки, $\sum_{j=1}^J \omega_j = 1; j = \{1, 2, \dots, J\}$ – індекси розглядуваних критеріїв; $F_j^0(x)$ – j -та складова ідеального вектора.

На першій стадії аналізу визначають тільки одне компромісне рішення за min–max $F^* = [F_1^*, F_2^*, \dots, F_j^*]^T$. На другій можна отримати таке компромісне рішення: $F^{*1}, F^{*2}, \dots, F^{*m}$. При цьому кількість розв'язків залежить від вибору способу пошуку. Пошук компромісних розв'язків на цій стадії поділено на етапи, які повторюються аж до закінчення програми. Коли застосувати вимірювання min–max з вагами, то залишаться значення ваг ω_j з першої стадії.

На кожному етапі другої стадії виконуються такі дії:

– операція схрещування – генерування нових ідеальних векторів. Вони стають обов'язковими векторами відліку та визначають компромісні розв'язки:

J необхідних ідеальних векторів ряду I

$$F^{01} = [F_1^*, F_2^0, \dots, F_J^0]^T, \quad F^{02} = [F_1^0, F_2^*, \dots, F_J^0]^T, \dots, \\ F^{0J} = [F_1^0, F_2^0, \dots, F_J^*]^T; \quad (8)$$

$J \cdot J$ ідеальних векторів ряду II

$$F^{011} = [F_1^{*1}, F_2^{01}, \dots, F_J^{01}]^T, \quad F^{012} = [F_1^{01}, F_2^{*1}, \dots, F_J^{01}]^T, \dots, \\ F^{01J} = [F_1^{01}, F_2^{01}, \dots, F_J^{*1}]^T \quad (\dots); \quad (9)$$

– визначення компромісних розв'язків (F^{*1}, F^{*2}) для кожного з ідеальних векторів (F^{01}, F^{02}) (рис. 3).

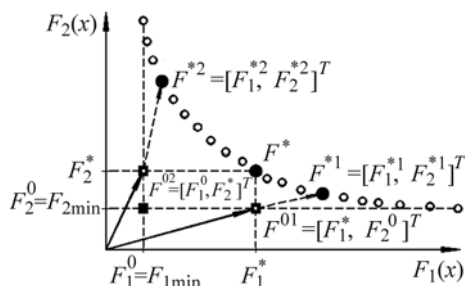


Рис. 3. Друга стадія методу визначення компромісних рішень за двокритеріальної мінімізації: \blacksquare – розміщення оптимальних векторів (F^{01}, F^{02}) та визначення компромісних розв'язків за min–max (F^{*1}, F^{*2}); \circ – оптимальний розв'язок за Парето; \bullet – компромісний розв'язок за min–max.

Fig. 3. The second stage of the method for bicriterial minimisation: \blacksquare – location of optimal vectors and determination of compromise solutions in min–max (F^{*1}, F^{*2}) sense; \circ – Pareto optimal solution; \bullet – compromise solution in min–max sense.

Багатокритеріальна оцінка евтектичних матеріалів. Щоб знайти матеріал або матеріали, найстійкіші до зношування, багатокритеріально оцінювали

одночасно досліджувані (див. табл. 1) та порівнювальні матеріали (ПГ–СРЗ і ПГ–10Н–01), а також зношені контртіла. Таким чином, всі вони інтерпретувалися однаково. Багатокритеріально проаналізували матеріали, які працювали в мастилі, мастилі з піском, а також під час зношування з різними контртілами та виявили, які з них найстійкіші до зношування у заданому робочому середовищі і за тертя по відповідному контртілу.

Багатокритеріальна оцінка зношування евтектичних покриттів за тертя з контртілом зі сталі 45. Характеристики зношування B і m (див. табл. 2) досліджуваних матеріалів з контртілом, виконаним зі сталі 45, визначені під час зношування матеріалів у середовищі оливи і оливи з піском, були мінімізовані. Для аналізу застосовано метод МВКР.

Під час зношування в середовищі мастила найкращим матеріалом виявився покритв одержаний з порошкового евтектичного матеріалу ПМІ-15, а в середовищі оливи з піском – матеріали ПМІ-15 і ПМІ-12. Під час аналізу результатів досліджень в двох вищенаведених середовищах вибрано неоптимальних п'ять пар тертя. Це означає, що за прийнятих і аналізованих критеріїв (B і m) кожен з матеріалів ПМІ-12...ПМІ-15, а також сталь 45, так само добрий з точки зору опірності до зношування. Додатковий аналіз, виконаний зі застосуванням методу МВКР, дав змогу з п'яти матеріалів виділити ПМІ-15 і ПМІ-12 як матеріали, найстійкіші до зношування.

Проведено також аналіз з використанням методу МІН. Вводячи достовірність інтервалу невизначеності $ІН = 3,5\%$, отримали чотири неоптимальні пари тертя (ПМІ-13...ПМІ-15, сталь 45), за значення $ІН = 5\%$ оптимальні розв'язки включали три пари тертя (ПМІ-14, ПМІ-15, сталь 45). Це означає, що якби вимірювальна похибка була рівна прийнятому значенню $ІН$, то різниця аналізованих критеріїв досліджуваних матеріалів знаходилась би в межах похибки вимірювань. Після цього, застосовуючи метод МВКР, провели додатковий аналіз, який показав, що з аналізованих матеріалів найстійкішим до зношування є ПМІ-15.

Отримані результати багатокритеріальної оцінки дуже добре корелюють з хімічним складом і структурою сплаву. Матеріал ПМІ-15 містить Ni , який призводить до збільшення кількості твердого розчину $Fe_\gamma(Ni)$ і дисипації енергії під час тертя. Звідси виникає його велика опірність до зношування. Пісок збільшує абразивне зношування. Щоб підвищити зносотривкість, до сплаву на основі $Fe-Mn-C-V$ додавали $18,22 \text{ mass.}\% Cr$ (ПМІ-12), що збільшило твердість твердого розчину на основі Fe_α . Врахувавши більшу подібність C до Fe , можна отримати дисперсійне зміцнення сплаву карбідом Cr_7C_3 ($HV 1600$). Цим і пояснюється найвища зносотривкість покриттів, одержаних із порошкового сплаву ПМІ-12.

Дискусія про одержані результати багатокритеріальної оцінки. Результати багатокритеріальної оцінки зносотривкості евтектичних матеріалів, проведені методом визначення компромісних розв'язків, вказують на перевагу розроблених евтектичних матеріалів порівняно з відомими [1, 16]. Крім того, висока зносотривкість матеріалів добре корелює з сегрегацією атомів, що відбувається під час тертя [17–20]. Проте дослідження поверхневого шару навіть об'ємом $\sim 1 \mu m^3$ з використанням рентгенівських методів (Superprobe-733, Camebax) не дають можливості виявити фізико-хімічні явища, які відбуваються під час тертя. Сегрегацію атомів C , V і Si , яку спостерігали на глибині до 1000 \AA , виявили, використовуючи Оже-спектроскопію (JAMP-10S, фірми JEOL) [17–19] (рис. 4), а сегрегацію на глибині $\sim 50...70 \text{ \AA}$ – за допомогою спектроскопії мас-вторинних іонів (INA 3) [20].

Внаслідок сегрегації атомів під час тертя концентрація C зросла з $0,7$ до $0,8$; V з $2,7$ до $4,8$; Si з $4,1$ до $18,3 \text{ mass.}\%$ (рис. 4).

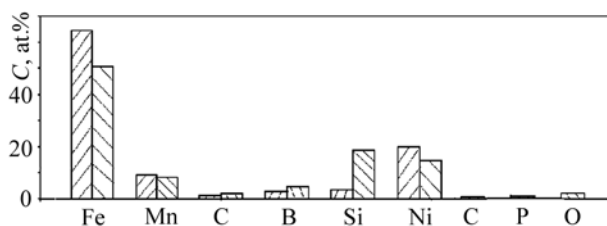


Рис. 4. Розподіл елементів на поверхні тертя (▨) та у порошковому сплаві (▩) системи Fe–Mn–C–B, легованому Ni.

Fig. 4. Distribution of elements on the friction surface (▨) and in the Fe–Mn–C–B powder alloy (▩), alloyed with Ni.

ВИСНОВКИ

Багатокритеріальний аналіз розроблених зносотривких евтектичних матеріалів системи Fe–Mn–C–B вказує на їх перевагу порівняно з відомими матеріалами системи Ni–Cr–B–Si типу ПГ–СР3, ПГ–10Н–01. Найкращим матеріалом, який може працювати за різних умов тертя, виявився покрив, одержаний з порошкового матеріалу ПМІ-15.

На основі одержаних результатів, використовуючи багатокритеріальний аналіз властивостей досліджуваних матеріалів, можна цілеспрямовано оптимізувати склад, структуру сплавів, а також евтектичних покривів системи Fe–Mn–C–B, легованих Si, Ni і Cr для підвищення їх опірності до зношування, а також відповідного добору пар тертя.

Метод визначення компромісних розв'язків дає змогу вибрати матеріали з найкращою зносотривкістю. Він може бути успішно використаний в подальших дослідженнях, які допоможуть підібрати матеріали для пар тертя під час розробки нових порошкових евтектичних матеріалів, дротів і електродів, а також технології формування покривів сучасними фізико-хімічними методами поверхневої обробки.

РЕЗЮМЕ. Проанализировано строение и состав эвтектических композиционных дисперсионно упрочненных материалов системы Fe–Mn–C–B, легированных Si, Ni и Cr. Подано многокритериальную оценку выбора материала, который характеризуется наивысшей износостойкостью в различных условиях трения и с разными контртелами. Оценено разработанные материалы типа ПМІ-12...ПМІ-15, а также серийно изготавливаемые сравнительные материалы системы Ni–Cr–B–Si типа ПГ–СР3, ПГ–10Н–01, известные много лет на мировом рынке. Для анализа использован метод определения компромиссных решений, а также метод раздела неопределенности, которые входят в состав эволюционной системы многокритериального анализа.

SUMMARY. The structure and composition of the eutectic composite dispersive strengthened Fe–Mn–C–B materials alloyed with Si, Ni and Cr are discussed. A multicriterial evaluation of the choice of material with the greatest resistance to friction wear in different friction conditions and with different counter bodies is presented. The PMI-12...PMI-15 materials, as well as industrially produced comparative Ni–Cr–B–Si (PG–SR3 and PG–10N–01) materials, known for many years in world markets, are analysed. The analysis was carried out using the compromise solution determination method and the non-differentiation interval method, included in the evolutionary system of multicriterial analysis.

1. Пашечко М. И., Голубец В. М., Чернец М. В. Формирование и фрикционная стойкость эвтектических покрытий. – К.: Наук. думка, 1993. – 346 с.
2. Методи прогнозування та підвищення зносотривкості триботехнічних систем ковзання / М. І. Пашечко, М. В. Чернець, М. Опеляк, Х. Комста. – Львів: Євросвіт, 2005. – 386 с.
3. Чернець М., Пашечко М., Невчас А. Поверхневе зміцнення конструкційних матеріалів трибосистем ковзання // Методи прогнозування та підвищення зносотривкості триботехнічних систем ковзання. В 3-х т. – Дрогобич: Коло, 2001. – 2. – 512 с.

4. *Електродугові відновні та захисні покриття* / В. І. Похмурський, М. М. Студент, В. М. Довгуник та ін. – Львів: Фіз.-мех. ін-т НАН України, 2005. – 192 с.
5. *Burakowski T., Wierzchoń T. Inżynieria powierzchni metali.* – Warszawa: WNT, 1995. – 556 s.
6. *Трибомеханика.* Триботехника. Триботехнологии / М. Чернець, Л. Клименко, М. Пашечко, А. Невчас // *Механика трибоконтактного взаимодействия при скольжении. Триботехнологии.* В 3-х т. – Николаев: Изд-во НГТУ им. Петра Могилы, 2008. – Т. 1. – 476 с.; Т. 2. – 304 с.
7. *Pashechko M., Montusiewicz J. Ocena wielokryterialna zużycia warstw eutektycznych układu Fe–Mn–C–B stopowanych Si, Ni oraz Cr* // *Inżynieria Powierzchni.* – 2009. – № 3. – S. 57–63.
8. *Montusiewicz J., Pashechko M. Analiza wielokryterialna odporności na zużycie warstw eutektycznych układu Fe–Mn–C–B stopowanych Si, Ni i Cr* / W. Tarnowski, T. Kiczowskiak // *Materiały XXV Ogól. Konf. Polioptymalizacja i Komputerowe Wspomaganie Projektowania Mielno'2007.* – Pol. Koszalińska, ZN WM, 2007. – № 40. – S. 208–215.
9. *Montusiewicz J. Ewolucyjna analiza wielokryterialna w zagadnieniach technicznych.* – Warszawa: Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, 2004. – 184 s.
10. *Montusiewicz J. Computer-aided reduction of the nondominated solution set using optimality in the sense of an undifferentiation interval* // *Modern techniques in mechanical engineering* / A. Świć, J. Lipski (Ed.). – Lublin, 2009. – S. 62–74.
11. *Montusiewicz J. A method of searching for compromising solutions* // *Rozwój techniki a problem kształcenia technicznego* / K. Lenik (red.). – Lublin: Lubelskie Towarzystwo Naukowe, 1996. – S. 50–70.
12. *Montusiewicz J. Komputerowe wspomaganie decyzji przy użyciu Ewolucyjnego Systemu Analizy Wielokryterialnej* // *Przegląd Mechaniczny.* – 2007. – № 5. – S. 107–110.
13. *Андрейків О. Е., Чернець М. В. Оцінка контактної взаємодії деталей машин, що труться.* – К.: Наук. думка, 1991. – 158 с.
14. *Андрейків О. Е., Панасюк В. В., Чернець М. В. До теорії зношування матеріалів при сухому терті* // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 1981. – № 2. – С. 51–57.
15. *Чернець М. В. До питання про дослідження кінетики зношування матеріалів при деяких видах тертя ковзання* // *Тертя і зношування.* – 1987. – № 4. – С. 662–670.
16. *Granat K. Wieloskładnikowe stopy Fe–C–Cr–Si odporne na zużycie, przeznaczone na odlewy i warstwy naprawane.* – Oficyna Wyd. Pol. Wrocławskiej, 2005. – 182 s.
17. *Paszeczko M. and Lenik K. Segregation of C, B, Si in the surface layers of new eutectic Fe–Mn–C–B–Si–Ni–Cr–Al–Sc at friction wear* // *Universyta di Roma “La Sapienza”.* – Italy: Rome, 2002. – C. 420.
18. *Pashechko M. and Lenik K. Segregation of atoms of the eutectic alloys Fe–Mn–C–B at friction wear* // *J. of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering.* – 2006. – **18**, № 1–2. September–October. – S. 467–470.
19. *Pashechko M. and Lenik K. Segregation of atoms of the eutectic alloy Fe–Mn–C–B–Si–Ni–Cr at friction wear* // *Wear.* – 2009. – № 267. – С. 1301–1304.
20. *Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии* / Пер. с англ. А. В. Белого, Н. К. Мышкин / Под ред. А. И. Свириденка. – М.: Машиностроение, 1986. – 360 с.

Одержано 04.01.2010