

УДК 620.169: 621.793

## ЗНОСОТРИВКІСТЬ ЕВТЕКТИЧНИХ ПОКРИВІВ СИСТЕМИ Fe–Mn–C–B, ЛЕГОВАНИХ Si, Ni і Cr

М. І. ПАШЕЧКО

Люблінський політехнічний інститут, Польща

Проаналізовано зносотривкість, будову і склад евтектичних покривів системи Fe–Mn–C–B, легованих Si, Ni та Cr, одержаних на сталі 45 методом електродугового і плазмового наплавлення із використанням евтектичних порошкових дротів. Під час зношування евтектичних покривів відбуваються інтенсивні дифузійні процеси, які призводять до сегрегації і, відповідно, зростання на поверхні тертя вмісту C, B та Si. Бор і кремній утворюють на фактичних плямах контакту нестехіометричні оксиди. Вуглець перебуває у вільному стані. Внаслідок цього зменшується коефіцієнт тертя, а отже, підвищується зносотривкість евтектичних стопів.

**Ключові слова:** *евтектичний покрив, зносотривкість, сегрегація атомів.*

Підвищення надійності та довговічності деталей машин і механізмів – одна з основних задач машинобудування. Тут важливо розробити нові матеріали для конструкційних елементів, що зношуються. Підвищення зносотривкості може стосуватись як цілого матеріалу, так і його поверхневих шарів. Матеріали та покриття, які використовують для виготовлення та зміцнення вузлів тертя і працюють в умовах зношування, головно абразивного, доцільно одержувати за допомогою сучасних методів поверхневої обробки [1–6]. Перспективні евтектичні покриття з великою твердістю, пластичністю та зносотривкістю [2–4, 6].

**Евтектичні стопи і покриття системи Fe–Mn–C–B.** Структура стопів і покриттів системи Fe–Mn–C–B складається з евтектики типу легований ферит (аустеніт, м'яка фаза–основа)–марганцевистий карбід заліза  $Fe_{0,4}Mn_{3,6}C$  (каркас) (рис. 1). Стоп дисперсійно зміцнюють карбід хрому  $Cr_7C_3$  та борид заліза  $Fe_2B$ . Марганцевистий карбід заліза – це твердий розчин карбідів системи  $Fe_3C–Mn_3C$ . Дослідження показали, що існує можливість керувати кількістю і взаємним співвідношенням фазових складників, завдяки чому можна одержати доевтектичні, евтектичні і заевтектичні стопи системи Fe–Mn–C або Fe–B–C, леговані Ni, Cr або Ni і Cr та іншими металами. Легування Cr призводить до збільшення розмірів дендритів на основі твердого розчину  $Fe_{\alpha}$ , а Ni –  $Fe_{\gamma}$ .

Додаткова перевага чотирикомпонентної системи Fe–Mn–C–B над відомими системами Fe–C, Fe–B, Ni–Cr–B–Si у тому, що марганець використовують як елемент, який формує фазу  $Fe_{0,4}Mn_{3,6}C$ . Легуванням Mn, як і в сталі Гадфільда, можна зміцнити деформований стоп після мартенситного перетворення. Необхідно зазначити, що структура, фазовий склад всіх досліджених стопів і покриттів відповідає структурі і фазовому складу порошкових матеріалів, з яких вони отримані.

Встановлено необхідний вміст заліза, марганцю, вуглецю і бору для одержання евтектичних стопів системи Fe–Mn–C–B. Вміст Ni, Cr, Ni–Cr обмежено, щоб отримати стопи із евтектичною структурою та заданими фізико-механічними властивостями поверхневих шарів (див. таблицю). Базову систему легували нікелем і хромом, щоб одержати зносо- і корозійнотривкі стопи та покриття.

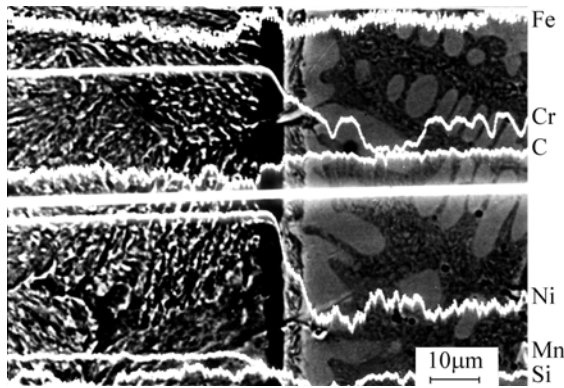


Рис. 1. Мікроструктура та розподіл елементів у евтектичному покритті системи Fe–Mn–C–B, легованих Si, Ni і Cr.  $\times 1000$ .

Fig. 1. Microstructure and distribution of elements of Fe–Mn–C–B–Si–Ni–Cr eutectic coating alloyed with Si, Ni and Cr.  $\times 1000$ .

**Хімічний склад евтектичних порошкових стопів, mass. %**

Марка стопу	Fe	Mn	Si	Ni	Cr	S	P
ПМІ-9	Решта	3,4	2,4	–	–	0,005	0,04
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

Стопи у вигляді порошкових матеріалів, дротів та електродів виробляють на Торезькому заводі наплавлювальних твердих стопів, ВАТ “Тулачермет” (Росія), Інституті зварювання в Глівіцах (Польща).

**Зносотривкість розроблених евтектичних стопів.** Систему Fe–Mn–C–B–Si досліджували на модернізованій і комп’ютеризованій машині тертя МІ-1М типу Амслера в умовах тертя без мащення впродовж 6 h. Зразки  $\varnothing 10$  mm виготовляли зі сталі 45 і наносили методами плазмового та електродугового наплавлення евтектичні покриття, використовуючи порошкові матеріали та дроти. Як контртіло застосовано 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 0,6 m/s. Шершавість оцінювали, використовуючи установку Surtronic 3+. Вивчали зносотривкість розроблених матеріалів ПМІ-9, ПМІ-12, ПМІ-13, ПМІ-14, ПМІ-15, а також системи Ni–Cr–B–Si: ПГ-СР3 і ПГ-10Н-01 (аналог порошкового стопу 10009 “Боротак” швейцарської фірми “Кастолін”). Під час тертя реєстрували швидкість обертання контртіла, струм живлення двигуна, що обертає контртіло, момент тертя і температуру зразка (рис. 2).

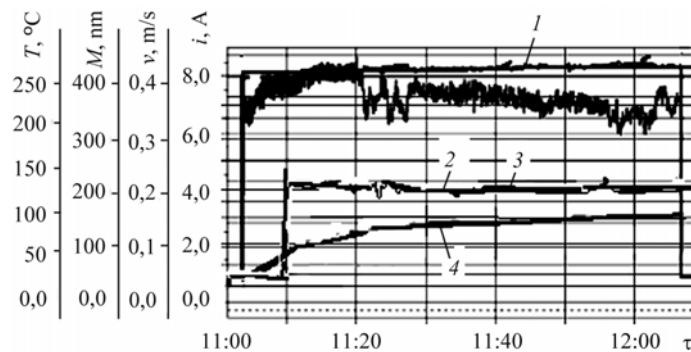


Рис. 2. Зміна параметрів тертя евтектичних покриттів: 1 – швидкість обертання контртіла; 2 – струм живлення двигуна; 3 – момент тертя; 4 – температура зразка.

Fig. 2. Change of the friction parameters of eutectic coatings: 1 – counter-body rotation speed; 2 – engine supply current; 3 – friction moment; 4 – specimen temperature.

Встановлено, що за питомих навантажень 3; 7 та 10 МПа втрата маси евтектичного покриття, одержаного методом плазмового наплавлення, 4 mg з поверхні тертя діаметром 10 mm. Для порівняння, втрата маси для покриттів із стопів ПГ-СРЗ становить 20 mg, а для ПГ-10Н-01 – 8 mg, якщо  $v = 0,8$  m/s,  $P = 0,15$  МПа,  $t = 8$  h [1, 2]. Тобто евтектичні стопи і покриття системи Fe–Mn–C–B–Si мають у 1,5 рази і більше вищу зносотривкість в умовах абразивного зношування, ніж матеріали ПГ-СРЗ, ПГ-10Н-01. Обумовлено це сегрегацією атомів С, В та Si на поверхню тертя і формуванням вторинних структур (нанофаз) у результаті трибосинтезу. Атоми сегрегують внаслідок термодифузії, активованої фрикційним розігрівом поверхні тертя [10], що призводить до зменшення коефіцієнта тертя [10–13].

Серед досліджуваних боровмісних матеріалів найвища зносотривкість притаманна покриттям, сформованим методом плазмового наплавлення, та дифузійним боридним. За питомого навантаження 3 МПа вони зношувалися практично однаково, а втрата маси пари тертя становила 0,94 та 1,68 g на користь дифузійного боридного покриття (рис. 3). За навантаження 7 МПа кінетика зношування евтектичного покриття не змінилася, тоді як втрата маси боридних покриттів зменшилася до 0,63 g. Порівнюючи втрати маси цих матеріалів після 6 h тертя за навантаження 10 МПа, бачимо, що кінетика зношування змінюється по-іншому. Якщо втрата маси пари тертя боридний покриття–сталь 45 становила 2,25 g, то пари евтектичний покриття–сталь 45 була 0,53 g з поверхні тертя діаметром 10 mm.

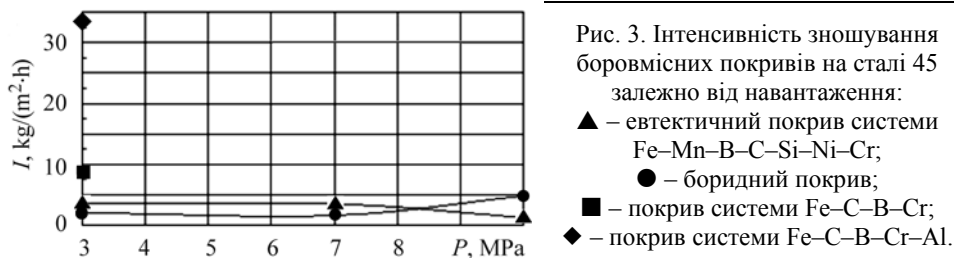


Рис. 3. Інтенсивність зношування боровмісних покриттів на сталі 45 залежно від навантаження: ▲ – евтектичний покриття системи Fe–Mn–B–C–Si–Ni–Cr; ● – боридний покриття; ■ – покриття системи Fe–C–B–Cr; ◆ – покриття системи Fe–C–B–Cr–Al.

Характер зношування цих покриттів після питомого навантаження 8,25÷8,5 МПа докорінно змінюється (рис. 3). За навантаження 3 МПа інтенсивність їх зношування практично однакова. Після тертя за навантаження 7 МПа інтенсивність зношування борованого покриття в 2 рази менша, ніж евтектичного. Після випробувань за навантаження 10 МПа інтенсивність зношування евтектичних покриттів у 4 рази менша за зношування боридних (рис. 3).

Рис. 4. Залежність коефіцієнта тертя боридних покриттів (▲), покриттів, сформованих методом плазмового наплавлення порошковими електродами системи Fe–Mn–B–C–Si–Ni–Cr (●), покриттів, одержаних методом електродугового напилення порошковими дротами систем Fe–C–B–Cr (■) та Fe–C–B–Cr–Al (◆) від питомого навантаження.

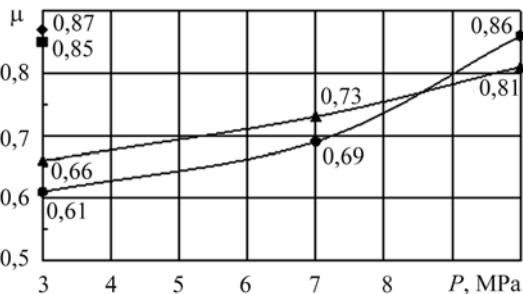


Fig. 4. Dependence of the friction coefficient of boride coatings (▲), coatings prepared by the method of electric arc melting with powder Fe–Mn–B–C–Si–Ni–Cr electrodes (●), coatings prepared by electric arc spraying with powder Fe–C–B–Cr (■) and Fe–C–B–Cr–Al (◆) wires on specific loading.

Зі збільшенням навантаження різкого зростання коефіцієнта тертя евтектичних покривів не фіксуємо (рис. 4). Його значення за навантаження 10 МПа в 1,2 рази вище, ніж за 3 МПа. Для боридних покривів він збільшується в 1,4 рази: стрімко за питомого навантаження, більшого за 7 МПа. Коефіцієнт тертя для напилених покривів систем Fe–C–B–Cr–сталь 45 та Fe–C–B–Cr–Al–сталь 45 за навантаження 3 МПа становить відповідно 0,85 та 0,87.

Отже, поверхнєве зміцнення можна ефективно використовувати для деталей машин і механізмів, які функціонують в умовах тертя без мастила. Для зміцнення деталей, які працюють у вузлах тертя за навантажень до 8,25...8,5 МПа, доцільніше дифузійне борування, а вище 8,5 МПа – евтектичні покриття.

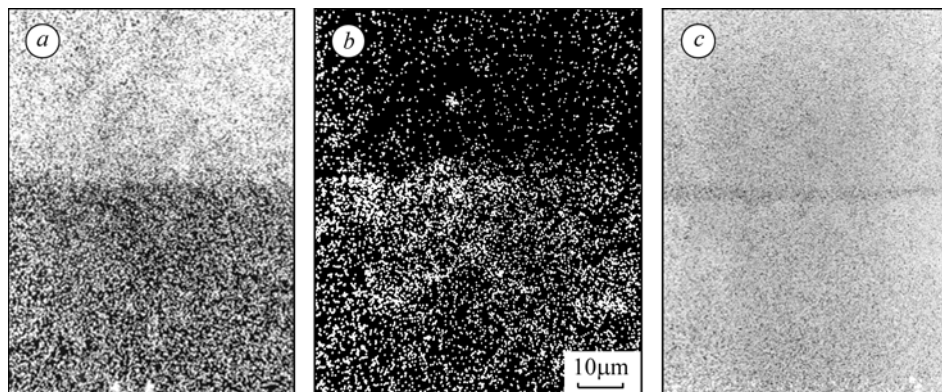


Рис. 5. Розподіл елементів С (а), В (b) та Fe (c) за глибиною евтектичного покриття системи Fe–Mn–C–B, легованого Si, Ni і Cr на сталі 45, отриманого методом плазмового наплавлення.  $\times 1000$ .

Fig. 5. Distribution of elements C (a), B (b) and Fe (c) by the depth of Fe–Mn–C–B eutectic coating alloyed with Si, Ni and Cr on steel 45 prepared by the method of the plasma welding.  $\times 1000$ .

**Аналіз стану поверхні тертя евтектичних стопів Fe–Mn–C–B, легованих Si, Ni, Cr, після досліджень їх зносотривкості.** Розподіл елементів C, B та Fe за глибиною евтектичного покриття системи Fe–Mn–C–B, легованого Si, Ni і Cr на сталі 45, отриманого методом плазмового наплавлення із використанням порошкових матеріалів ілюструє рис. 5. Видимих змін на поверхні тертя або за глибиною не виявлено. Одержано структуральний градієнт у результаті фазових змін і сегрегації атомів C, B, Si під час тертя. За допомогою Оже-електронної спектроскопії дослідження сегрегації атомів після зношування евтектичних покривів на основі системи Fe–Mn–C–B–Si, легованих Ni, Cr, Al [8–10], виявили підвищення концентрації C, B та Si на поверхні тертя. Вміст C зростає з 2,4 до 2,7; B з 8,8 до 33,0; Si з 3,0 до 11,4 at.% (рис. 6). Атоми сегрегують на глибині до 1000 Å. За формою піків спектра вуглецю можна зробити висновок, що він знаходиться у вільному (аморфному) стані.

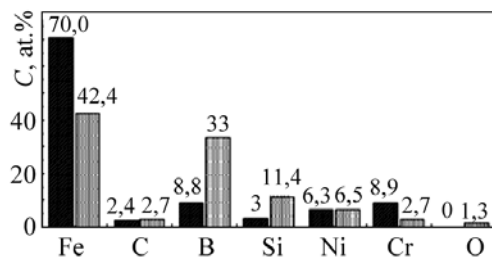


Рис. 6. Розподіл елементів на поверхні тертя (▨) та у порошковому стопі (■) системи Fe–Mn–C–B–Si–Ni–Cr.

Fig. 6. Distribution of elements on the friction surface (▨) and in Fe–Mn–C–B–Si–Ni–Cr powder alloy (■).

Наприклад, у сплаві мідь–алюміній (1% алюмінію в міді) нагрів до 200°C достатній для поверхневої сегрегації легованого елемента [13]. В результаті поверхневий шар складається в основному з атомів алюмінію, тому і властивості

поверхні визначає його вміст.

Важливо вивчити фрикційну взаємодію матеріалів і зрозуміти сегрегаційні явища. Зокрема, поверхнева сегрегація атомів може суттєво змінити механізм взаємодії поверхні з докільціям і мастильними матеріалами. В евтектичних матеріалах або сталі навіть за легування невеликою кількістю кремнію формування захисних мастильних плівок залежить від взаємодії молекул мастильних речовин з атомами кремнію, а не заліза [7–9, 13]. Тут надзвичайно важливий аналіз сегрегації.

Головна відмінна ознака процесу тертя – відсутність дифузії кисню із атмосфери повітря у глибину покриву. У зразку, легovanому Ni та Cr, кисень дифундує на глибину до 5...20  $\mu\text{m}$ . Однак його максимальна локальна кількість 1,3 at.% свідчить про відсутність фазоутворення великої кількості оксидів на поверхні тертя евтектичного покриву. Формування оксидів можливе на фактичних плямах контакту.

На фактичних плямах контакту поверхні тертя утворюються оксидні фази системи  $\text{B}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$ . Температура плавлення її стопів збільшується від 450 (температура плавлення  $\text{B}_2\text{O}_3$ ) до 1650°C (температура плавлення  $\text{SiO}_2$ ) (рис. 7) [10]. Таким чином, можна стверджувати, що під час тертя внаслідок сегрегації атомів B та Si на поверхні композита можливе утворення оксидів  $\text{B}_2\text{O}_3$  або системи  $\text{B}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$ , які за відповідних режимів тертя розм'якшуються або переходять у рідкий стан. Це сприяє зменшенню коефіцієнта тертя. Беручи до уваги те, що температура плавлення  $\text{B}_2\text{O}_3$  становить 450°C,  $\text{B}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$  дорівнює 450...1650°C, можна зробити

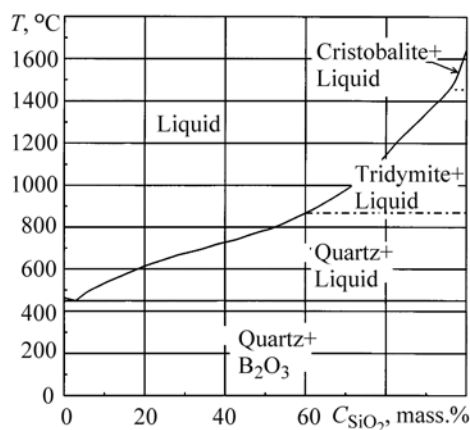


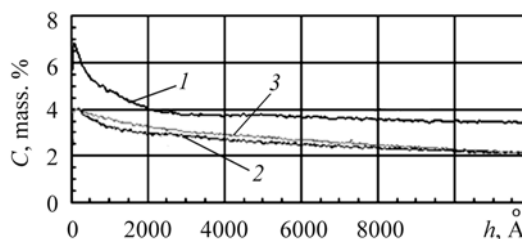
Рис. 7. Діаграма стану системи  $\text{B}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$ .

Fig. 7. Phase diagram of the  $\text{B}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$  system.

висновок, що температура в зоні тертя перевищувала 450°C. Розплавлена плівка  $\text{B}_2\text{O}_3$  або  $\text{B}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$ , що сформувалася під час тертя, слугує мастилом. Вона запобігає підвищенню температури на поверхні тертя вище температури плавлення  $\text{B}_2\text{O}_3$  або композиції системи  $\text{B}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$ .

Рис. 8. Розподіл концентрації вуглецю в евтектичних покриттях за різних питомих навантажень (МПа): 1 – 3; 2 – 7; 3 – 10.

Fig. 8. Distribution of carbon content in eutectic coatings at different specific loads (MPa): 1 – 3; 2 – 7; 3 – 10.



Як бачимо (рис. 8), в евтектичних покриттях системи Fe–Mn–C–B–Si–Ni–Cr вміст вуглецю за глибиною збільшується. Досліджували, використовуючи спектроскопію мас вторинних нейтралей [14]. Процеси приповерхневого науглецювання інтенсивніші за навантаження 3 МПа. Максимальна його концентрація на глибині 150 Å для евтектичного покриву становить 6,8 mass.%. Вуглець забезпечує мащення поверхні тертя та зменшує коефіцієнт тертя.

## ВИСНОВКИ

Таким чином, під час зношування композиційних дисперсійно зміцнених евтектичних стопів на основі системи Fe–Mn–C–B, легованих Si, Ni та Cr, відбуваються інтенсивні дифузійні процеси, які призводять до сегрегації і, відповідно,

зростання на поверхні тертя вмісту С, В та Si. Бор і кремній утворюють на фактичних плямах контакту нестехіометричні оксиди системи Fe–C–B–O. Вуглець перебуває у вільному стані. Внаслідок цього зменшується коефіцієнт тертя, а отже, підвищується зносотривкість евтектичних стопів [7–9]. Отже, поверхнєве зміцнення ефективно для деталей машин і механізмів, які працюють у важких умовах тертя без мастила. Для зміцнення деталей, які працюють у вузлах тертя за навантажень до 8,25...8,5 МПа доцільніше дифузійне борування, а вище 8,5 МПа евтектичні покриття.

*РЕЗЮМЕ.* Проаналізовані зносостійкість, строение и состав евтектических покрытий системы Fe–Mn–C–B, легированных Si, Ni и Cr и полученных на стали 45 методом электродуговой и плазменной наплавки с использованием евтектических порошковых проволок. При изнашивании евтектических покрытий наблюдаются интенсивные диффузионные процессы, которые приводят к сегрегации и увеличению на поверхности трения содержания С, В и Si. Бор и кремний образуют на фактических пятнах контакта нестехиометрические оксиды. Углерод находится в свободном состоянии, что приводит к уменьшению коэффициента трения, а следовательно, к повышению износостойкости евтектических сплавов.

*SUMMARY.* Wear resistance, structure and composition of eutectic Fe–Mn–C–B coatings, alloyed with Si, Ni, and Cr on steel 45 by the method of plasma and electric arc welding with the use of eutectic powder wires are analyzed. Under eutectic coatings wear the intensive diffusion processes, which cause segregation and increase of the content of C, B, and Si on the surface, are observed. B and Si form non-stoichiometric oxides on the real contact spots. Carbon is in the free state, thus giving a lower friction coefficient and accordingly a higher wear-resistance of eutectic alloys.

1. Пашечко М. И., Голубец В. М., Чернец М. В. Формирование и фрикционная стойкость евтектических покрытий. – К.: Наук. думка, 1993. – 343 с.
2. Трибомеханика. Триботехника. Триботехнологии / М. Чернец, Л. Клименко, М. Пашечко, А. Невчас. – Николаев: Изд-во НГТУ им. Петра Могилы, 2008. – Т. 2, кн. 1. – 212 с; Т. 2, кн.2. – 304 с.
3. Поверхнєве руйнування і зміцнення матеріалів / М. Пашечко, М. Чернец, М. Опеляк, Х. Комста. – Львів: Євросвіт, 2005. – 384 с.
4. Burakowski T., Wierzchoń T. Inżynieria powierzchni metali. – Warszawa: WNT, 1995. – 556 s.
5. Електродугові відновні та захисні покриття / В. І. Похмурський, М. М. Студент, В. М. Довгуник та ін. – Львів: Вид.ФМІ НАН України, 2005. – 192 с.
6. Чернец М., Пашечко М., Невчас А. Поверхнєве зміцнення конструкційних матеріалів трибосистем ковзання // Методи прогнозування та підвищення зносостійкості триботехнічних систем ковзання: в 3-х т. – Дрогобич: Коло, 2001. – Т. 2. – 512 с.
7. Чичинадзе А. В. Основы трибологии (трение, износ, смазка). – М.: Центр “Наука и техника”, 1995. – 779 с.
8. Костецкий Б. И. Структурно-энергетические основы управления трением и износом в машинах. – К.: Общество “Знание”, 1990. – 33 с.
9. Lawrowski Z. Tribologia. Tarcie, zużycie i smarowanie. – Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1993. – 315 s.
10. 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.
11. Pashechko M. and Lenik K. Segregation of atoms of the eutectic alloys Fe–Mn–C–B at friction wear // J. Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2006. – 18, № 1–2. – S. 467–470.
12. Paszczko 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 // Uniwersyta di Roma “La Sapienza”. – Italy: Rome, 2002. – С. 420.
13. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии / Пер. с англ. А. В. Белого, Н. К. Мышкина / Под ред. А. И. Свириденка. – М.: Машиностроение, 1986. – 360 с.
14. Косско И. А. Оже-микроскопический анализ вторичных структур на поверхности керамических и металлических материалов, формируемых при трении в воздушной и углеродсодержащих средах. Дис. соиск. к. т. н. – К.: Киевский ин-т инженеров гражданской авиации, 1992. – 166 с.

Одержано 25.11.2009