

Панарін В.Є.,*
Гуменюк І.А.,**
Кіндрачук М.В.,**
Тісов О.В.**

* Інститут металофізики

ім. Г.В. Курдюмова НАН України,

** Національний авіаційний університет,
м. Київ, Україна

E-mail: nau12@ukr.net

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОІСКРОВИХ
ПОКРИТТІВ З ЕВТЕКТИЧНОГО СПЛАВУ
НА СТАЛІ 12X18H10T**

УДК 621.891

У роботі досліджено тертя і зношування евтектичних сплавів в умовах сухого тертя. Матеріалом для нанесення покриття був розроблений евтектичний сплав із карбідним зміцненням. Покриття на поверхню сталі 12X18H10T наносили електроіскровим методом у захисній атмосфері. Триботехнічні випробування виконано на машині тертя М22-П, у якості контртіла використано сталь 45 загартовану до твердості 45 HRC. Випробувано три серії покриттів – без обробки (у стані «як нанесено»), і після відпалу – 15 і 45 хв. Структура необробленого покриття є тонким конгломератом фаз, що змінює механізм зміцнення матеріалу (порівняно з литим сіаном). У вихідному стані покриття має високу корозійну стійкість, твердість і порівняно високу зносостійкість. Шляхом відпалу нанесеного покриття можна змінювати його механічні і триботехнічні властивості і підібрати необхідні характеристики для заданих умов тертя.

Ключові слова: електроіскрові покриття, нерівноважний стан, сталь 12X18H10T, диборид хрому, диборид титану, тонкий конгломерат фаз.

Вступ

В останні десятиліття увагу розробників нових матеріалів все більше привертають можливості використання метастабільних станів, що виникають в умовах ведення нерівноважної кристалізації металевих сплавів. Такі умови виникають, наприклад, при нанесенні покриттів фізичними методами, які використовують концентровані джерела енергії з великою густиною потужності – лазери, плазмові потоки, детонаційно-газові методи, електроіскрове легування, наплення вибухом тощо. [0, 0]. Високоенергетичний вплив на матеріал за малі проміжки часу приводить до виникнення в покритті нерівноважних фаз і структур, які в звичайних чи інших більш рівноважних умовах, не утворюються [0]. Ці стани надають покриттям властивості, що визначаються поєднанням нерівноважних структур і фаз і, крім того, з'являється можливість керувати їхніми властивостями шляхом переведення покриття як термодинамічну систему до більш рівноважного стану.

Тут необхідно відмітити важливий момент. Змістити покриття, що знаходиться в нерівноважному стані, в сторону термодинамічної рівноваги можна двома шляхами. Перший – це цілеспрямований зовнішній енергетичний вплив (наприклад, дифузний відпал, зовнішня деформація, лазерний переплав, ультразвукова обробка тощо). Другий – це мимовільний зовнішній енергетичний вплив, який виникає безпосередньо у процесі роботи покриття (наприклад, в умовах тертя, корозійної дії, циклічної взаємодії з іншим тілом). У другому випадку можна говорити про самоорганізацію системи і оптимальну її пристосованість до умов зовнішнього руйнівного впливу. Рушійною силою такого процесу є зниження внутрішньої енергії системи за умов підведення енергії ззовні за рахунок дисипації будь-яким способом.

Реалізація другого варіанту видається більш ефективною, оскільки створити умови для самоорганізації нерівноважної системи простіше, ніж заздалегідь спрогнозувати і забезпечити оптимальну структуру і склад покриття для заданих умов роботи.

Евтектичні сплави на основі заліза з тугоплавкими боридами квазіпотрійної системи 12X18H9- CrB_2 - TiB_2 [0] відповідають правилу Шарпі, оскільки в литому стані вони містять тверді кристали боридів (~ 20 об.%) і м'яку, пластичну металеву матрицю (~ 80 об. %), що відповідає складу неіржавної сталі 12X18H9 (рис. 1, а). Було показано, що евтектичні сплави зазначеної системи в литому вигляді мають високу зносостійкість, з мінімальним сумарним зносом пари тертя в контакт з різними сталями в умовах сухого тертя ковзання на повітрі і високу корозійну стійкість [0]. Зсув за складом сплавів цієї системи в за- або доевтектичну область призводить до збільшення сумарного зносу пари тертя, що відповідає закону Курнакова.

Нанесення покриттів з евтектичних сплавів зазначеної системи газотермічним або методом конденсації, стимульованим іонним бомбардуванням, розширює за складом область мінімального сумарного зносу пари тертя і знижує його величину в порівнянні з литим станом. Пояснюється це формуванням більш дисперсної структури покриття і термодинамічно більш нерівноважним в порівнянні з литим станом.

У даній роботі поставлено завдання: дослідити можливість поширення на електроіскрові покриття висновків про ефективність управління триботехнічними властивостями евтектичних покриттів, що створені за рахунок диспергації їх структури і використання різного ступеня нерівноважності.

Метод електроіскрового легування, так само, як і зазначені вище методи, дозволяє досягти високої концентрації енергії електричного розряду в малих розплавлених об'ємах матеріалу електрода за короткі проміжки часу. Оскільки підкладка при цьому залишається практично холодною (її інтегральна температура знаходиться поблизу кімнатної), то під час кристалізації розплавленого матеріалу катода можна досягти великих швидкостей охолодження, що приведе до появи нерівноважних станів у покритті. Ці особливості створюють умови, що є аналогічними до умов, які створюються під час використання зазначених вище методів нанесення покриттів. Це дає підстави очікувати існування аналогічних закономірностей зношування і зносостійкості.

Методика дослідження

Для вирішення поставленого завдання були отримані електроіскрові покриття з розробленого евтектичного сплаву [0] на підкладці зі сталі 12X18H10T. Оскільки сплав містить активні метали (Ti, Cr), які здатні інтенсивно окислюватися на повітрі за підвищених температур, процес електроіскрового легування проводився в атмосфері захисного газу – аргону. Для порівняння ефективності впливу на триботехнічні характеристики різних термодинамічних нерівноважних станів випробувалися як покриття у початковому стані, так і покриття, що були відпалені за двома різними режимами. Відпал проводився у вакуумній печі СШВЛ за тиску залишкової атмосфери 5 мм. рт. ст. і температурі 900 °С ($0,75T_{пл}$) протягом 15 і 45 хв. Охолоджувалися зразки з піччю.

Випробування на тертя і зношування проводилися на установці М22-П за наступних умов: схема сполучення: вал – частковий вкладиш; матеріал контртіла – сталь 45 (HRC 45); тертя – без мащення; швидкість ковзання - 0,5 м/с; питомі навантаження - 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3 МПа; площа зразка – 1 см²; шлях тертя - 1000 м.

Дослідження мікроструктури покриттів і поверхні тертя проводилися на металографічному мікроскопі «Neophot-2» і растровому електронному мікроскопі Jeol-45 з використанням аналізатора з мікрорентгеноспектральною приставкою MXR.

Результати дослідження

Мікроструктура вихідного напиленого електроіскрового евтектичного покриття (рис. 1, б) є сумішшю ультрадисперсних кристалів бориду титану і хрому, які рівномірно розподілені в металевій матриці, що має склад неіржавійної сталі 12X18H9. Білі області в покритті – це частини покриття, які не протравлюються в реактиві і ділянки тонкого конгломерату фаз, що не розпалися; а темніші – ділянки покриття, які частково перетаорені і перебувають у більш рівноважному стані. Така структура покриттів принципово відрізняється структури від литого стану (рис. 1, а), оскільки внаслідок великої швидкості охолодження, що реалізовується під час електроіскрового напилення, відбувається зміна механізму евтектичної кристалізації з формуванням структури тонкого конгломерату фаз [0].

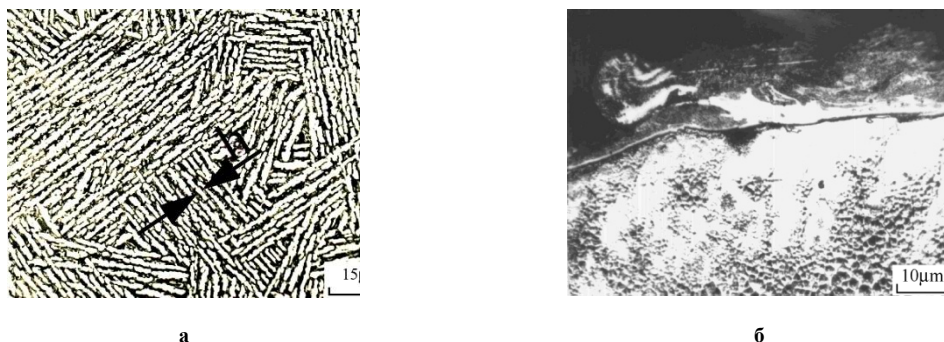


Рис. 1 – Структура досліджуваного евтектичного сплаву в литому стані (а) і напиленого у вигляді електроіскрового покриття (б)

Формування такої структури зумовлює зміну механізму зміцнення в порівнянні з литим станом. За невеликих швидкостей охолодження (під час рівноважної кристалізації розплаву) формується розгалужений каркас із боридів, що несе основне навантаження під час тертя, а сталева матриця передає і перерозподіляє напруження між його окремими гілками. Така структура досить жорстка, термодинамічно стійка, здатна витримувати високі навантаження і робочі температури, але володіє високою крихкістю,

яка визначається крихкістю фаз впровадження. За умов досягнення критичної швидкості охолодження [0] в електроіскровому евтектичному покритті формується структура тонкого конгломерату фаз, у якій основне навантаження несе металева матриця, а дисперсні кристали боридів зміцнюють її, блокуючи рух дислокацій. На рис. 1, а стрілками вказана товщина кристалів боридів, а на рис. 1, б в нижній частині знімка видно підкладку зі сталі 12X18H10T. Така будова теоретично передбачає вищу пластичність у порівнянні зі структурою литого стану [0]. Однак насправді у необробленому електроіскровому покритті пластичність знижена внаслідок перенасичення твердого розчину на основі заліза боридними фазами.

Високотемпературний відпал вихідного покриття приводить до часткового розпаду пересієної металевої матриці, зниження мікротвердості і коагуляції спочатку високодисперсних кристалів боридів [0, 0]. Зі збільшенням часу відпалу ступінь розпаду твердого розчину на основі заліза і ступінь коагуляції кристалів боридів зростають, що приводить до зміни мікромеханічних властивостей структурних складових покриття. Це, в свою чергу, відбивається на триботехнічних характеристиках покриття в цілому (рис. 2).

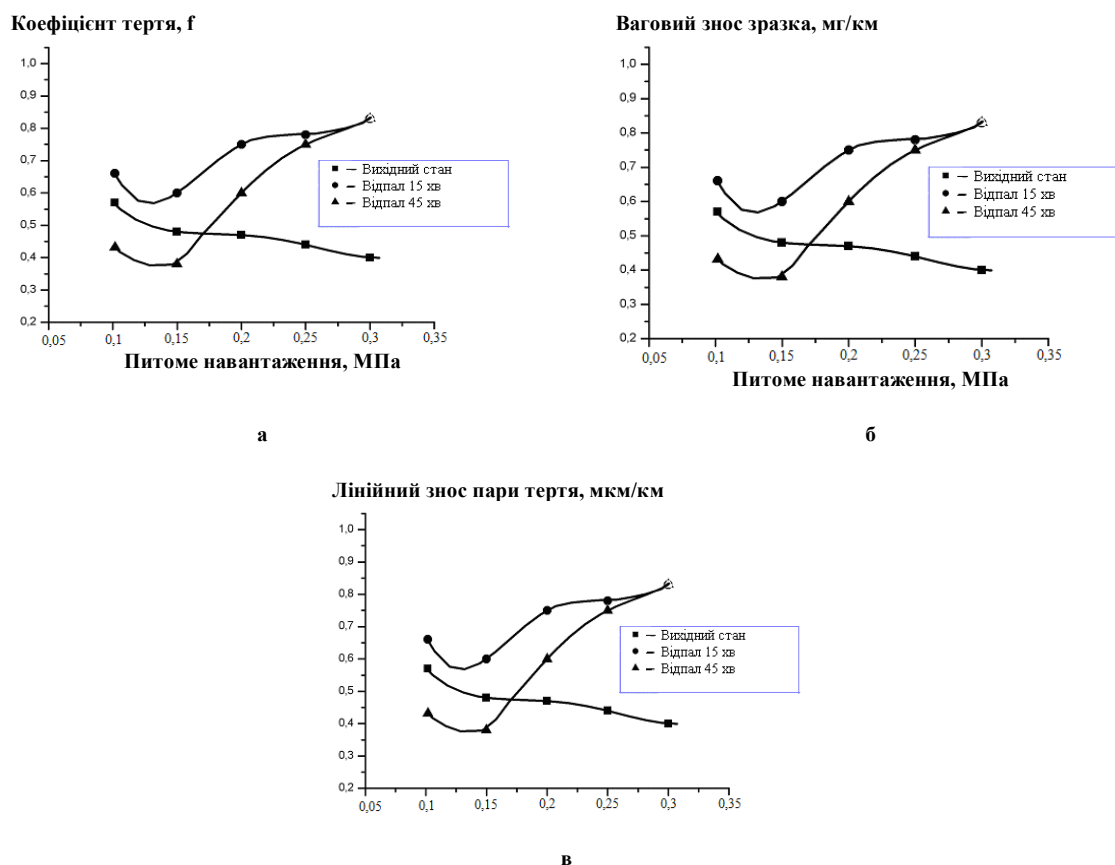


Рис. 2 – Триботехнічні властивості електроіскрових евтектичних покриттів в вихідному і відпаленому за різними режимами станів

Якщо коефіцієнт тертя вихідного покриття навіть дещо знижується зі збільшенням навантаження, то у відпалених покриттях залежність складніша (рис. 1, а). Більш тривалий відпал (45 хв) до питомих навантажень 0,15 МПа обумовлює мінімальні значення f , нижчі ніж в початковому стані, а при великих значеннях P він різко зростає. Причому характер залежності зберігається для обох режимів відпалу, що практично виключає помилку експерименту. Така залежність визначається описаними вище процесами зниження твердості, міцності і підвищення пластичності, металевої матриці покриття, яка несе основне навантаження. Ці ж процеси можуть призвести до збільшення вагового зносу покриття при великих питомих навантаженнях (рис. 2, б), що спостерігається для обох режимів відпалу. Катастрофічне збільшення зносу відпаленого протягом 15 хв покриття при $P > 0,15$ МПа, швидше за все викликано повним зношенням покриття до підкладки і його безпосередньою участю в процесі тертя.

Наведене пояснення підтверджується дослідженням поверхні тертя вихідних і відпалених покриттів (рис. 3). Якщо на поверхні тертя вихідного покриття видно сліди крихкого руйнування і викришування окремих областей, то після відпалу протягом 15 хв з'являються сліди пластичної деформації, ступінь якої збільшується при збільшенні тривалості відпалу до 45 хв.

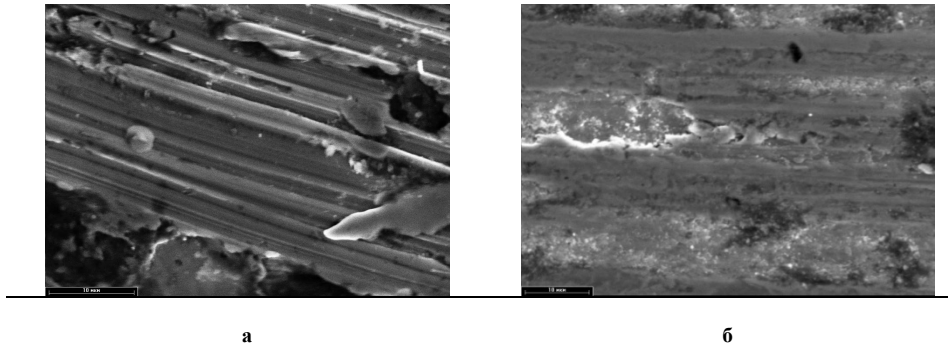


Рис. 3 – Поверхня тертя вихідного (а) і відпаленого (б) протягом 15 хв при 900 ° С електроіскрового евтектичного покриття

За результатами дослідження хімічного складу утворених в процесі тертя плівок були встановлені наступні закономірності. В основі всіх окисних плівок, як вихідного, так і відпалених покриттів, лежать сполуки заліза з киснем, іноді леговані хромом і нікелем в кількості (в атомних частках, %) 18,6 - 1,8 і 4,9 - 0,17 відповідно. Склад цих сполук відповідає формулам Fe_3O_4 і Fe_2O_3 . Інші метали, присутні в покритті, незважаючи на їх велику, в порівнянні з залізом активність, самостійних оксидів не утворюють. Збільшення часу відпалу сприяє зниженню корозійної стійкості вихідного покриття і, як наслідок, призводить до збільшення кількості окисних плівок (якісна оцінка проводилася за інтенсивністю піків елементів).

Необхідно відзначити, що проведений відпал вихідних покриттів не тільки знижує їх крихкість, але і одночасно знижує їх початково високу корозійну стійкість. Як зазначалося вище, невідпалені покриття слабо травляться в реактиві і при терті утворюють порівняно невелику кількість окисних плівок. Завдяки низькому коефіцієнту тертя сумарний знос пари тертя мінімальний. При відпалі відбувається частковий розпад металеві матриці, підвищується її пластичність і одночасно знижується корозійна стійкість – зростає активність травлення в реактиві, інтенсифікується процес утворення окисних плівок при терті. Таким чином, в результаті відпалу покриттів відбуваються конкуруючі процеси, які призводять до протилежних результатів. З одного боку, збільшується кількість окисних плівок, які грають роль твердого мастильного матеріалу, і зростає пластичність, що знижує утомне руйнування і викришування покриття, що приводить до зниження зношування. З іншого боку, відпал призводить до зниження твердості і міцності металеві матриці, яка несе навантаження і сприяє підвищенню зношування покриття, особливо за великих навантажень. Таким чином, змінюючи ступінь нерівноважного стану отриманих покриттів шляхом їх відпалу, можна в деякому діапазоні змінювати їх триботехнічні властивості, мінімізуючи сумарний знос пари тертя. Оскільки встановлені залежності триботехнічних властивостей для вихідних і термооброблених покриттів досить сильні, з'являється можливість самоорганізації оптимального стану досліджених покриттів для різних умов тертя (різні матеріали контртіла, навантаження, швидкості ковзання, температурний режим тертя, атмосфера тощо).

Висновки

1. У досліджених евтектичних покриттях, отриманих методом електроіскрового легування, в процесі наплення відбувається формування високодисперсної термодинамічної нерівноважної структури тонкого конгломерату фаз. Такі покриття мають високу зносостійкість при терті ковзання без мастила в парі з загартованою сталлю 45.

2. Відпал отриманих електроіскрових евтектичних покриттів призводить до зниження коефіцієнта тертя при питомих навантаженнях до 0,15 МПа і зниження зносостійкості при великих навантаженнях.

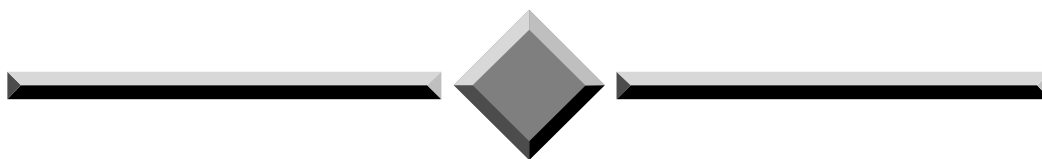
3. Створення різного ступеня нерівноважних станів у досліджених евтектичних покриттях призводить до зміни їх триботехнічних властивостей, що дозволяє підбирати оптимальні параметри сполученої пари в різних умовах тертя.

Література

1. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, И. В. Зуев, А. И. Ко-кора. – М.: Машиностроение. – 1991. – 147с.
2. Высокоэффективные лазерно-плазменные технологии в машиностроении / В. А. Барвинок, В. М. Новикови, Г. М. Змеевской и др. – М.: Машиностроение – 1997. – 74 с.

3. Виноградов Б. А., Гаврилин В. Н., Либенсон М. Н. Теоретические основы воздействия лазерного излучения на материалы: Учебн. пособие. – Благовещенск.: Изд-во БПИ. – 1993. – 344 с.
4. Шурип А. К. Износостойкость нержавеющей эвтектических сплавов с фазами внедрения/ А. К. Шурип, В. Е. Панарин, М. В. Киндрачук // Проблемы трения и изнашивания. – К.: Техніка, – 1981. – №19. – С. 65 – 73.
5. Пат. 102244 України. Зносостійкий евтектичний сплав на основі заліза / Киндрачук М. В., Лабунець В. Ф., Денисенко М. І., Загребельний В. В., Гуменюк І. А.; № и 2015 03259; заявл. 07.04.2015; опубл. 26.10.2015, Бюл. № 20.
6. Таран Ю. Н., Мазур В. И. Структура эвтектических сплавов. – М.: Металлургия, 1978. – 311 с.
7. Панарин В. Е. Структурные изменения в эвтектических сплавах железа, затвердевших с различными скоростями // Металловедение и обработка металлов. – 1997. – №1. – С. 20 – 25.
8. Панарин В. Е. Газотермические покрытия из эвтектических сплавов на основе железа с ультрадисперсной структурой / В. Е. Панарин, О. В. Микуляк, М. В. Киндрачук, А. И. Бондарь // Защитные покрытия на металлах. – 1988. – №22. – С. 26 – 30.
9. Киндрачук М. В. Влияние термоциклической обработки на структуру и свойства плазменных покрытий из эвтектических сплавов на основе железа / М. В. Киндрачук, В. Е. Панарин, Ю. Н. Москаленко // Металловедение и обработка металлов. – 1995. – №1. – С. 38 – 45.
10. Панарин В. Е., Микуляк О. В., Киндрачук М. В. Возможности управления триботехническими свойствами эвтектических газо-термических покрытий на основе железа с фазами внедрения // Трение и износ. – 1985. – Т.6. – №5. – С. 932 – 936.

Поступила в редакцію 07.11.2017



Проблеми трибології
“Problems of Tribology”
E-mail: tribosenator@gmail.com

Panarin V., Humeniuk I., Kindrachuk V., Tisov O. **Investigation of tribotechnical properties of electrospark coatings made of eutectic alloy based on steel 12X18H10T.**

In current work we have investigated an urgent problem of managing tribological properties of steel based composite coating. As a material of the coating we used an eutectic alloy with chromium and titanium diborides as strengthening phases. The chemical composition of matrix material was a composition of stainless steel 12X18H9. IA substrate material is a steel 12X18H10T. For coating deposition we used an electrospark method in protective argon atmosphere, which allows to obtain coating material in quasistable condition. As a result of equilibrium cooling the coating has the following structure: dendritic crystals of diborides with spaces filled with steel matrix. These strengthening crystals bear the major amount of friction load. Increasing the cooling rate of molten material the coating structure changes (after some critical cooling rate) – it turns to a fine strengthening crystals embedded into steel matrix. We call this a fine phase conglomeration. Reheating the coating allows to turn this conglomeration to more (or to equilibrium) thermodynamically stable state (coating annealing). For tribological testing we used a wear test facility M22-P which utilizes a shaft - bush test specimens layout. A counterspecimen (shaft specimen) material is steel 45 hardened to 45 HRC. We have tested three series of specimens without any treatment (as deposited condition), і після відпалу – 15 і 45 хв. It was proved, that coating reheating changes hardness, corrosion resistance, wear resistance. By selecting heating temperature and annealing duration it is possible to change tribological behavior of material. This allows to select a definite set of properties, which are required for particular application.

Key words : electrospark coating, nonequilibrium state, steel 12X18H10T, chromium diboride, titanium diboride, fine phase conglomeration.

References

1. Lazernaya i elektronno-luchevaya obrabotka materialov: Spravochnik. N. N. Ryikalın, A. A. Uglov, I. V. Zuev, A. I. Ko-kora. M.: Mashinostroenie. 1991. 147p.
2. Vysokoeffektivnyie lazerno-plazmennyye tehnologii v mashinostroenii. V. A. Barvinok, V. M. Novikovı, G. M. Zmeevskoy i dr. M.: Mashinostroenie 1997. 74 p.
3. Vinogradov B. A., Gavrilin V. N., Libenson M. N. Teoreticheskie osnovyi vozdeystviya lazernogo izlucheniya na materialyi: Uchebn. posobie. Blagoveschensk. Izd-vo BPI. 1993. 344 p.
4. Shurin A. K. Iznosostoykost nerzhavayushchih evtekticheskikh splavov s fazami vnedreniya. A. K. Shurin, V. E. Panarin, M. V. Kindrachuk. Problemy treniya i iznashivaniya. K.: Tehnika, 1981. №19. P. 65 – 73.
5. Pat. 102244 Ukrayiny. Znosostiykyy evtektichnyy splav na osnovi zaliza. Kindrachuk M. V., Labunets' V. F., Denysenko M. I., Zahrebel'nyy V. V., Humenyuk I. A.; # y 2015 03259; zayavl. 07.04.2015; opubl. 26.10.2015, Byul. # 20.
6. Taran Yu. N., Mazur V. Y. Struktura evtekticheskikh splavov. M.: Metallurhiya, 1978. 311 p.
7. Panarin V. E. Strukturnyye izmeneniya v evtekticheskikh splavah zheleza, zatverdevshih s razlichnyimi skorostyami. Metallove-denie i obrabotka metallov. 1997. №1. P. 20 – 25.
8. Panarin V. E. Gazotermicheskie pokryitiya iz evtekticheskikh splavov na osnove zheleza s ultradispersnoy strukturoy. V. E. Panarin, O. V. Mikulyak, M. V. Kindrachuk, A. I. Bondar. Zashchitnyie pokryitiya na metallah. 1988. №22. P. 26 – 30.
9. Kindrachuk M. V. Vliyanie termotsiklicheskoy obrabotki na strukturu i svoystva plazmennyyih pokryitiy iz evtekticheskikh splavov na osnove zheleza. M. V. Kindrachuk, V. E. Panarin, Yu. N. Moskalenko. Metallovedenie i obrabotka metallov. 1995. №1. P. 38 – 45.
10. Panarin V. E., Mikulyak O. V., Kindrachuk M. V. Vozmozhnosti upravleniya tribotekhnicheskimi svoystvami evtekticheskikh gazo-termicheskikh pokryitiy na osnove zheleza s fazami vnedreniya. Trenie i iznos. 1985. Vol.6. №5. P. 932 – 936.