

**Стечишин М.С.,  
Білик Ю.М.,  
Мартинюк А.В.,  
Голонжка В.М.**

Хмельницький національний університет,  
м. Хмельницький, Україна  
**E-mail:** m-mezon@ukr.net

## **ЕЛЕКТРОХІМІЧНИЙ МЕТОД ОЦІНКИ КАВІТАЦІЙНО - ЕРОЗІЙНОЇ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПОКРИТТІВ**

УДК 621.193.16

В роботі описано спосіб оцінки зносостійкості термодифузійних, і полімеркомпозиційних покриттів при їх кавітаційно-ерозійному зношуванні в середовищах - електролітах. Спосіб ґрунтується на розробленій методиці електрохімічних випробувань безпосередньо в процесі кавітації.

**Ключові слова:** покриття, зносостійкість, кавітація.

### **Вступ**

Для знаходження кавітаційно-ерозійної стійкості найбільшого поширення дістали установки з магнітострикційним вібратором (МСВ), ударно-ерозійні стенди (УЕС) та гідродинамічні труби (ГТ) [1]. При цьому здебільшого кавітаційна стійкість матеріалів визначається за втратами маси, або об'єму за 1 ... 3 год проведення випробувань. Недоліком такого способу є те, що структура і фазовий склад, наприклад, термодифузійних покриттів змінюються по товщині покриття і, відповідно, змінюються втрати маси. Так, при кавітаційному зношуванні сталі 38ХМЮА після газового азотування, швидкість руйнування  $\epsilon$ -фази при випробуванні на УЕС складає 60 ... 65 мг/год, нітридної зони – 5 мг/год і  $\alpha$ -фази – 2 мг/год [2]. Дослідження на установці з МСВ також показали, що швидкість кавітаційного зношування карбідних покриттів залишається постійною лише до границі карбідної складової з зоною легованого матеріалу, а далі різко зростає і настає зона катастрофічного руйнування поверхні [3]. Отже, оцінка кавітаційної зносостійкості покриттів повинна включати оцінку зносостійкості його структурних складових, що дає можливість оптимізувати структуру покриття збільшенням вмісту і глибини залягання кавітаційно-стійких фаз.

Недоліком оцінки зносостійкості полімерних покриттів за втратами маси є неможливість порівняння результатів випробувань різних полімерів між собою внаслідок великої різниці густини полімерних матеріалів. Крім того, в момент дії кавітаційних бульбашок на двошарові системи з різними акустичними властивостями (покриття-підложка), ударні хвилі частково відбиваються від підложки і проходять в зворотньому напрямку, що викликає появу тангенційних напружень і, відповідно, деформацій зсуву ділянок поверхні покриття. Останнє зумовлює відшарування покриття від поверхні підложки та наступний відрив відшарованих ділянок покриття. При подальшій кавітації відбувається руйнування основного матеріалу (підложки), який також враховують при оцінці зносостійкості покриття.

В основу розробленого способу поставлено завдання підвищення точності оцінки довговічності полімерних і полімеркомпозиційних покриттів при їх кавітаційно-ерозійному зношуванні в середовищах-електролітах, отримання порівняльних характеристик стійкості полімерів, оптимізації складу полімеркомпозиційних полімерів за вмістом і співвідношенням компонентів наповнювача, товщини покриття, тощо.

Крім того, для оцінки кавітаційної зносостійкості термодифузійних і полімерних покриттів за втратами маси для отримання достовірних даних, час кавітації на установках з МСВ становить біля 60 хв. У такому випадку точність оцінки довговічності знаходиться в межах  $\pm 30$  хв, що в багатьох випадках приводить до неправильної оцінки зносостійкості покриттів, а також оцінки впливу на зносостійкість структурних складових термодифузійних та різних за наповненням полімеркомпозиційних покриттів.

### **Методика проведення досліджень**

Термодифузійне хромовання зразків зі сталі 45 і сірого чавуну СЧ20 проводили в негерметичних контейнерах в порошковій суміші (50 % -  $\text{FeCr}_2$ , 43 % -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  і 7 % -  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) при температурі 1100 °С і часу дифузії до 6 год. Дослідження на кавітаційно-ерозійну стійкість проводили на установці з магнітострикційним вібратором (МСВ) при частоті коливань вібратора 22 кГц, температурі 3 %-вого розчину хлориду натрію 23 °С і амплітуді коливань вібратора 36 мкм.

Ефективність розробленого способу також досліджувалася на прикладі полімеркомпозиційних покриттів на основі епоксидної смоли ЕД-16, де в якості наповнювача використовувалася суміш, яка складалася з карбідів тугоплавких металів зернистістю 20 ... 100 мкм. Композиція I містила 230 % (за масою), а композиція II – 270 % наповнювача. Отримували також композиції з вмістом наповнювача 130; 170 і 190 % (за масою) [3].

Випробування проводили на установці з магнітострикційним вібратором (МСВ) в 3 % - му розчині хлориду натрію при температурі розчину  $23 \pm 2$  °С [5].

### Виклад матеріалів досліджень

Завданням дослідження теродифузійних покриттів була оцінка впливу структурних фазових складових покриття на кавітаційно - ерозійну зносостійкість, підвищення достовірності і точності оцінки довговічності теродифузійних покриттів.

Поставлене завдання вирішувалося тим, що оцінка довговічності проводилася не за втратами маси або об'єму, а по швидкості руйнування структурних складових покриття:

$$v_p = (\Delta m_i - \Delta m_{i-1}) / (\Delta \tau \cdot S); \quad (1)$$

$$v_p = (\Delta V_i - \Delta V_{i-1}) / (\Delta \tau \cdot S), \quad (2)$$

де  $\Delta m_i - \Delta m_{i-1}$ ;  $\Delta V_i - \Delta V_{i-1}$  - втрати, відповідно, маси або об'єму зразка (мг, мм<sup>3</sup>) за час проведення випробувань  $\tau$ , год з одиниці поверхні зразка  $S$ , см<sup>2</sup>.

Крім того, паралельно потенціостатом знімали залежність потенціал - час випробувань ( $\Phi - \tau$ ). Руйнування кожної структурної складової характеризується постійним значенням швидкості руйнування  $v_p$  і потенціалом  $\Phi$ , а їх різкі коливання є свідченням руйнування структурної складової покриття або повного руйнування покриття і початку руйнування основного металу. Час від початку проведення випробування до моменту різкої зміни швидкості руйнування  $v_p$ , яка виявляється на кривій  $v_p - \tau$  служить оцінкою довговічності покриття  $\tau_0$ , що уточнюється за кривою  $\Phi - \tau$ .

Дослідження хромованих в порошок зразків сталі 45 і сірого чавуну СЧ20 на установці з МСВ в 3 %-му розчині хлориду натрію показали (рис. 1), що в початковий період швидкість руйнування зростає, далі на протязі певного часу залишається постійною внаслідок рівномірного руйнування карбідної зони покриття. При руйнуванні карбідної зони швидкість різко зростає так як руйнування зони легованого матеріалу проходить шляхом локалізації мікроударного навантаження на дефектах у вигляді пор, включень і по цій причині поширюється в глибину покриття, що поряд з підвищенням швидкості викликає і нерівномірність руйнування.

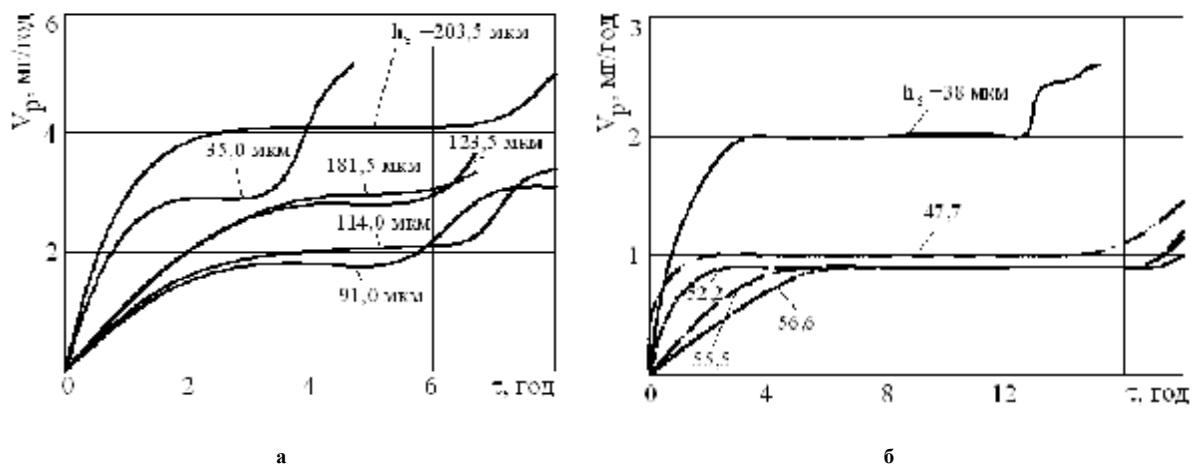


Рис. 1 – Кінетика зміни швидкості руйнування  $v_p$  теродифузійно хромованого покриття на сталі 45 (а) та сірого чавуну СЧ20 (б) в 3 %-му розчині хлориду натрію залежно від товщини карбідної зони  $h_z$  покриття

Нерівномірність руйнування карбідної зони покриття також фіксується на кривій потенціал - час кавітації ( $\Phi - \tau$ ) різкими коливаннями потенціалу (рис. 2).

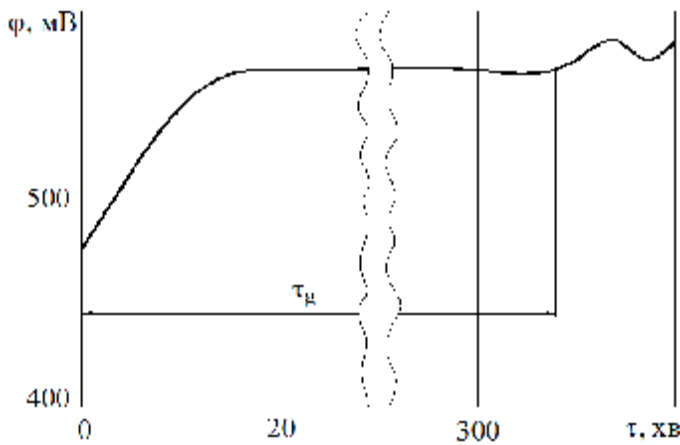


Рис. 2 – Кінетика зміни потенціалу хромованого покриття при кавітації в 3 %-му розчині хлориду натрію (сталь 45, товщина карбідної зони  $h_s = 91$  мкм)

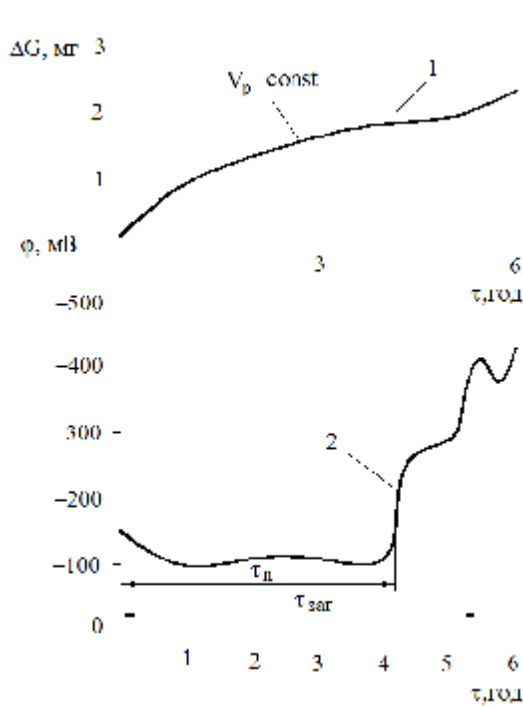
рого чавуну СЧ20 проводили аналогічно хромуванню зразків сталі 45. Кавітаційну зносостійкість визначали при нижньому розміщенні досліджуваного зразка, що при збільшенні часу випробувань запобігає його розтріскуванню і руйнуванню в місці кріплення.

Довговічність покриття з товщиною карбідної зони  $h_s = 38$  мкм за кривою швидкість руйнування – час випробування ( $v_p - \tau$ ) становить 720 хв, а за залежністю потенціал час кавітації ( $\phi - \tau$ ), відповідно, 736 хв. Аналогічно знаходять значення довговічності для інших зразків з різною товщиною карбідної зони.

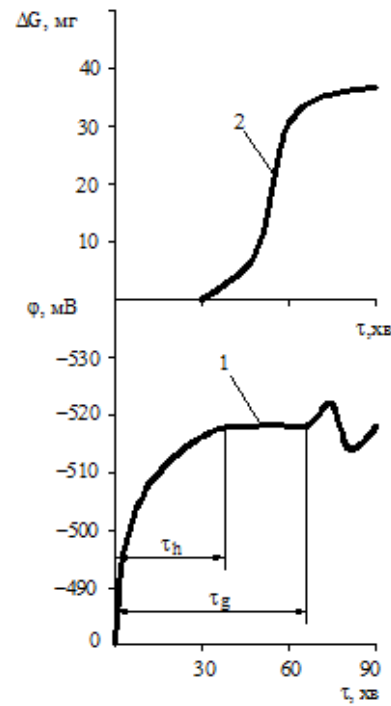
У випадку кавітаційно-ерозійних випробувань підвищення точності оцінки зносостійкості полімеркомпозиційних покриттів досягалось тим, що при кавітації зразків у середовищах - електролітах паралельно із їх зважування за певний час проведення випробувань потенціостатом знімали і записували кінетику зміни потенціалу  $\phi - \tau$ . Розроблений спосіб відрізняється тим, що оцінка довговічності покриття проводиться не за втратами маси, а за часом загальної працездатності покриття  $\tau_{zag}$  та за часом пробою покриття  $\tau_n$ , які фіксуються на кривій  $\phi - \tau$  (рис. 3).

Покриття з різною товщиною карбідної зони мають різні швидкості руйнування  $v_p$  (рис. 1). Так, при товщині карбідної зони на сталі 45  $h_{cl} = 35; 91; 114; 123,5$  мкм, встановлена швидкість руйнування, відповідно, сягала  $v_p = 2,9; 1,5; 20$  і  $2,7$  мг/см<sup>2</sup>·год, а довговічність визначена за цими залежностями становила: 200; 300; 340; 360 хв, відповідно. З використанням залежностей потенціал-час випробувань ( $\phi - \tau$ ), які отримували безпосередньо в процесі кавітаційного руйнування зразків, маємо уточнені значення довговічності, а саме: 242; 306; 340 і 353 хв, відповідно.

Термодифузійне хромування сі-



а



б

Рис. 3 – Кінетика зміни потенціалу (1) і втрати маси зразка (2) з композицією I (а) і з композицією II (б)

Оцінка загального часу працездатності покриття  $\tau_{заг}$  проводиться за часом від початку проведення випробувань до моменту різкої зміни потенціалу після досягнення ним значень характерних для зразка без покриття. Подальші різкі коливання потенціалу характеризують руйнування поверхні основного матеріалу. Дослідження показали, що при досягненні часу  $\tau_{заг}$  більше 50 % площі зразка було вільним від покриття. На частині покриття, що залишилося спостерігаються глибокі язви, вириви і раковини, які проникають аж до основного металу зразка.

Для усіх полімерних покриттів характерна наявність ділянки їх руйнування з постійною швидкістю  $v_p$ , що описується прямолінійною залежністю на кривій  $\Delta m - \tau$  (рис. 3). Ця ділянка відповідає рівномірному зменшенню товщини покриття і незначному відхиленню потенціалу на кривій  $\Phi - \tau$  від потенціалу основного металу в даному середовищі. Час від початку випробувань до часу досягнення потенціалу кривої  $\Phi - \tau$  значень в межах близьких до значень потенціалу основного металу в даному середовищі приймався за час пробою покриття  $\tau_n$ . У цей момент часу внаслідок утворення мікротріщин проходить проникнення мікрооб'ємів середовища в матеріал покриття і, при певних умовах взаємного накладання мікротріщин, досягається контакт середовища з основним металом.

Розроблений спосіб оцінки довговічності полімерних і полімеркомпозиційних покриттів за двома параметрами  $\tau_{заг}$  і  $\tau_n$  дозволяє підвищити точність оцінки зносостійкості, отримати порівнювальні між собою дані зносостійкості, що особливо важливо при оцінці зносостійкості полімеркомпозиційних полімерів з різним вмістом наповнювача. Він також може бути використаний для оптимізації товщини, вмісту і співвідношення компонентів наповнювача в покритті тощо.

У результаті проведених досліджень отримали для композиції I.

Загальна працездатність шару покриття  $\tau_{заг}=115$ хв, час пробою шару  $\tau_n=40$ хв (рис. 3, а). Для композиції II:  $\tau_{заг} = 45$  і  $\tau_n=20$ хв (рис. 3, б). Втрати маси за 1 год випробувань становлять 54 і 41 мг, відповідно для композиції I і II. Таким чином, за часом пробою композиція I в 2 рази переважає композицію II і в 2,56 рази за часом загальної працездатності, а за втратами маси всього в 1,32 рази.

Запропонований спосіб оцінки довговічності також дозволяє знайти оптимальне співвідношення, як у даному випадку, між епоксидною смолою та кількістю наповнювача. Криві залежності  $\tau_{заг}$  і  $\tau_n$  від відсотка вмісту наповнювача (рис. 4) показують, що найбільш ефективними є композиції, які містять наповнювач в межах 190 ... 230 %. При меншому вмісті наповнювача (менше 230 %) збільшується  $\tau_n$ , що пов'язано з оптимальним співвідношенням міцнісних і пружних властивостей покриття. Зі збільшенням вмісту наповнювача дещо зменшується величина  $\tau_n$ , але різко зростає  $\tau_{заг}$ , що зумовлено зростанням механічних характеристик шару покриття.

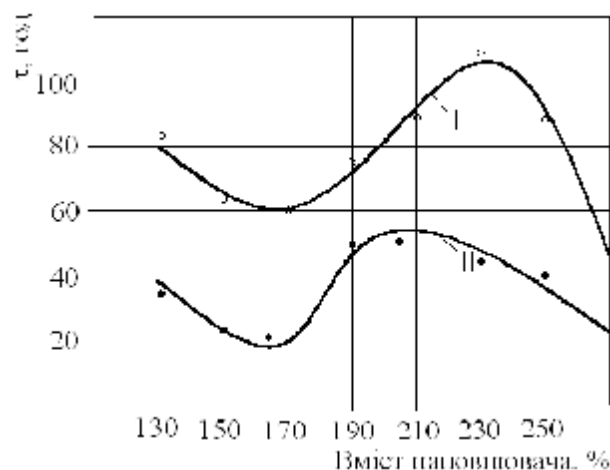


Рис. 4 – Залежність загальної довговічності  $\tau_{заг}$  (1) і часу пробою  $\tau_n$  (2) від вмісту наповнювача, %

Таким чином, запропонований спосіб [6] дозволяє оптимізувати склад покриття за вмістом наповнювача. Аналогічно можна провести оптимізацію за гранулометричним складом наповнювача, співвідношенням вмісту карбідів, товщини покриття.

## Висновки

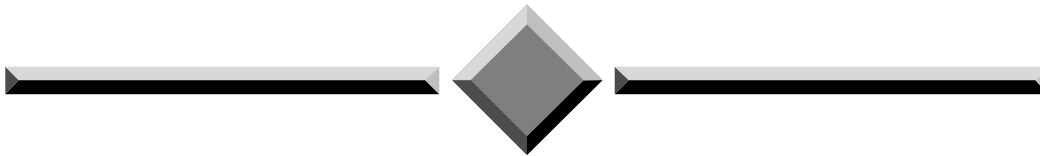
1. В результаті проведених досліджень розроблено спосіб оцінки довговічності термодифузійних карбідних покриттів за швидкістю руйнування карбідної зони, а уточнене значення довговічності визначається аналізом кінетики зміни потенціалу в процесі кавітаційного руйнування покриття.

2. Розроблено також спосіб знаходження довговічності полімерних і полімеркомпозиційних покриттів при їх кавітаційно-ерозійному зношуванні в середовищах-електролітах, що включає отримання кінетичної кривої втрат маси  $\Delta m - \tau$ , а оцінка довговічності покриття проводиться за часом загальної працездатності  $\tau_{заг}$  і часом його пробою  $\tau_n$ , які фіксуються на кривій  $\Phi - \tau$  і узгоджуються з відповідними змінами кривих кінетики втрат маси  $\Delta m - \tau$ .

## Література

1. Богачев И.Н. Кавитационное разрушение и кавитационно-стойкие сплавы. – М.: Металлургия, 1972. – 192с.
2. Юргенсон А.А. Азотирование в энергомашиностроении. – М.: Машгиз, 1962. – 131с.
3. Стечишин М.С. Кавітаційно-ерозійна зносостійкість зміцнених поверхонь конструкційних сталей в середовищах харчових виробництв / М.С. Стечишин, О.О. Білецький, А.І. Береговий, А.В. Мартинюк // Вісник ТНТУ. – 2012. – №2. – С. 63-71.
4. Стечишин М.С. Зносостійкість зміцнених поверхонь конструкційних сталей в корозійно-активних середовищах / М.С. Стечишин, В.В. Форкун, А.І. Береговий, Ю.М. Білик // Проблеми трибології. – 2011 – №4 – С. 12-19.
5. Мартинюк А.В. Кавітаційно-ерозійна зносостійкість полімерних матеріалів в середовищах харчових виробництв: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня к. тех. наук: спец. 05.02.04 «Тертя та зношування в машинах» / А.В. Мартинюк; ХНУ. – Хмельницький, 2013. – 21 с.
6. Пат. № 55103 UA, МПК G01N 3/56. Спосіб оцінки довговічності полімерних і полімеркомпозиційних покриттів при їх кавітаційно-ерозійному зношуванні в середовищах-електролітах / М. С. Стечишин, Н. М. Стечишин, О. О. Білецький, А. В. Мартинюк ; заявник і патентовласник Хмельницький нац. університет. – № u 201004888 ; заявл. 23.04.2010 ; опубл. 10.12. 2010, Бюл. № 23, 2010 р.

Поступила в редакцію 18.09.2014



**Проблеми трибології**  
**“Problems of Tribology”**  
**E-mail: [tribosensor@gmail.com](mailto:tribosensor@gmail.com)**

**Stechishin M.S., Billik Y.M., Martinyuk A.V., Golongka V.M. Electrochemical methods of wear resistance deposited on the metal surface.**

The methods of estimation of cavitation-erosion wearproofness of thermal diffusion chromic coverage's and polymercomposit coverages are in process described on carbon steel 45 and grey cast-iron of CЧ20. The thermal-diffusion chrome-plating was conducted in powders untight containers at the temperature of 1100 °C and to time of diffusion 6 hours.

Polymercomposit of plated consisted of basis – epoxy resin of ED- 16, and as a filler used mixture of carbides of refractory metals the grittiness of 20 ... 100 μm. Got compositions with content of filler 130, 170, 190, 230 and by 270 mass).

Tests conducted on setting with a magnetostriction vibrator in a 3% solution of chloride of sodium at the temperature of solution 23±2 °C.

The estimation of cavitation-erosion wearproofness of thermal-diffusion chromic coverages was estimated after speed of losses mass or volume of plated, but not after the losses of mass. At the same time took off dependence potential-time of realization of cavitation tests ( $\Phi - \tau$ ) after that specified time of destruction of carbide constituent of coverage (time of longevity  $\tau_0$ ) exactness of estimation here rises from ± 30 min to ± 1min.

At tests polymer of composition coverages the estimation of their longevity was conducted at times general capacity of coverage and at times hasp of coverage. The worked out method allows to promote exactness of estimation of wearproofness, to conduct optimization of thickness, content and ratio of components of filler in plated.

**Keywords:** floor, durability, cavitation.

**References**

1. Bogachev I.N. Cavitationnoe razrushenie i cavitationno-stoykie splavu. M.: Metalurgiya, 1972. 192s.
2. Yurgenson A.A. Azotirovanie i energomashinostroenie. M.: Mashgiz, 1962. 131s.
3. Stechishin M.S. Kavitaciyno-eroziyna znosostiykist zmicnenuh poverhon konstrukciynuh staley v seredovishchah harchovih vurobnuctv. M.S. Stechishin, O.O. Bileckiy, A.I. Beregovuy, A.V. Martunyuk. Visnik TNTU. 2012. №2. S.12-19.
4. Stechishin M.S. Znosostiykist zmicnenuh poverhon konstrukciynuh staley v koroziyno-aktivnyh seredovushchah. M.S. Stechishin, V.V. Forkun, A.I. Beregovuy, Y.M. Biluk. Problemu trubologii: Khmelnickiy. 2011 №4. S.12-19.
5. Martinyuk A.V. Kavitaciyno-eroziyna znosostiykist polimernuh materialiv v seredovushchah harchovih vurobnuctv: avtoref. dis. na zdobuttya nauk. stupenya k. the. nauk: spec. 05.02.04 «Tertya ta znoshuvanya v mashinah». HNU. Khmelnickiy, 2013. 21s.
6. Pat. № 55103 UA, MPK G01N 3/56. Sposib ocinku dovgovichnosti polimernuh I polimerkompozuciynuh pokrutiv pru ih cavitaciyno-eroziynomu znoshuvanni v seredovushchah-elektrolitah. M.S. Stechishin, N.M. Stechishin, O.O. Bileckiy, A. V. Martinyuk; zayavnik I patentovlasnik Khmelnickuy nacionalniy universitet. – № u 201004888; zayavl. 23.04.2010; opubl. 10.12.2010, byl. № 23, 2010r.