

**Н.В. Тарельник, М.М. Майфат**

*Сумський національний аграрний університет*

## **ЗАХИСТ ДЕТАЛЕЙ З ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУННУ ВІД ГІДРОАБРАЗИВНОГО ЗНОСУ КОМБІНОВАНИМИ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИМИ МЕТОДАМИ**

*Запропонована нова технологія захисту деталей з високоміцних чавунів, яка полягає в електроіскровому легуванні їх поверхні алюмінієм з подальшим нанесенням шару електродом з композиційного матеріалу 90%VK6+10%1M. На сформоване покриття наносять металополімерний матеріал, армований порошком WC, ZrN або їх сумішшю, доданих в двокомпонентну епоксидну систему, наповнену феросиліконом марки Loctite 3478 при концентрації армуючої речовини, відповідно ~ 80% WC; 80% ZrN і 40%WC+40%ZrN. Частину шару МПМ видаляють шліфуванням до виступів шорсткості нанесеного покриття.*

*Ключові слова:* електроіскрове легування, високоміцний чавун, деталь, гідроабразивний знос, цементация, алітування, покриття, металополімерний матеріал.

**N.V. Tarelnyk, M.M. Maifat**

## **PROTECTING OF HIGH-STRENGTH CAST IRON PARTS FROM HYDRO ABRASIVE WEAR THEREOF BY COMBINED ENVIRONMENTALLY SAFE METHODS**

*There has been proposed a new technology for protecting the parts made of high-strength cast iron. The technology consists in electrospark alloying (ESA) of the part surfaces with aluminum followed by applying a special layer thereon with the use of an electrode made of 90%VK6+10%1M composite material. Onto the formed coating, there is applied a metal-polymer material (MPM), reinforced with WC and ZrN powders or their mixture, which has been added to a two-component epoxy system filled with Loctite 3478 ferrosilicon at the concentration of the reinforcing substances of ~ 80% WC; 80% ZrN and 40%WC+40%ZrN, respectively. After that, a portion of the MPM layer is removed by grinding it up to the applied coating roughness protrusions.*

*Comparative examinations have established that for the high-strength cast iron of VCh50 grade, in terms of hydro abrasive wear resistance thereof, the best results had been achieved by the specimens with the coating formed in the sequence of ESA Al → ESA (90% VK6 + 10% 1M) → MPM (80% ZrN), the wear of which was 97.1% less as compared to the specimens without coatings, 44.1% less as compared to the prototype (the specimens of 12X18H10T steel) and, accordingly, 5.9 and 14.7% less as compared to the specimens with the coating formed in the sequence of ESA Al → ESA (90%VK6+10%1M) → MPM (40 %WC+40%ZrN) and in the sequence of ESA Al → ESA (90%BK6+10%1M) → MPM (80% WC).*

*Key words:* electrospark alloying, high-strength cast iron, part, hydro abrasive wear, carburizing, aluminizing, coating, metal-polymer material.

### **Постановка проблеми.**

Високоміцний чавун (ВЧ) із кулястим графітом, який суміщає в собі технологічні властивості сірих чавунів з низкою відзнак сталевих матеріалів, отриманих шляхом, як лиття так і кування с кожним роком все більше застосовується в різних галузях вітчизняної промисловості: машинобудівній, хімічній, транспортній, залізничній, при видобутку та переробці нафти та газу, тощо і з кожним роком попит на нього збільшується. Згідно з [1] аналіз світового ринку лиття свідчить, що за кількістю (24,6 %) відливки з ВЧ займають проміжне місце між сірим чавуном (44,9%) та алюмінієвими сплавами (15,4 %). З високоміцних чавунів виготовляють безліч деталей, які застосовуються в гідравлічному обладнанні: арматурі, насосах різного призначення, центрифугах, сепараторах, зрощувальних і поливних машинах тощо. Розширення галузі застосування кола деталей гідравлічних машин з ВЧ залежить від їх надійності та довговічності, пов'язаних з їх можливістю чинити опір зношуванню.

Деталі гідравлічних машин підлягають різним видам зношування (абразивному, кавітації, корозії тощо), основним з яких є гідроабразивне зношування. Тому роботи, направлені на підвищення стійкості деталей з ВЧ проти гідроабразивного зношування, актуальні і своєчасні.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Аналіз літературних і патентних джерел показує, що існує велика кількість робіт, направлених на покращення параметрів якості поверхневих шарів деталей з чавунів, у тому числі і ВЧ. При цьому дослідниками використовуються різні технології: плазмове поверхнєве модифікування [2], нанесення у вигляді шлікера сумішей різного складу з подальшим висушуванням і нагріванням плазмотроном [3] фрикційною обробкою [4], введенням домішок модифікаторів [5], підігріванням перед заливанням форми [6] тощо.

В [7] авторами був проведений аналіз технологій, за допомогою яких можливо відновлювати зношені поверхні сталних і чавунних деталей. При цьому перевага віддавалась методам, які базуються на технологіях, що базуються на використанні висококонцентрованих джерел енергії: електролітичний метод [8, 9], газотермічне напилення [10, 11], лазерної обробки [12 - 15] та електроіскрове легування (ЕІЛ) [16]. В результаті аналізу розглянутих технологій перевага була віддана методу ЕІЛ, особливостями якого є: можливість використання в якості матеріалу, що наноситься, чистих металів, сплавів, сталей різного ступеню легування, металокерамічних матеріалів, графіту тощо, міцний зв'язок нанесеного металу з основою, локальність процесу, низька енергоємність та екологічна безпека тощо [17]. При застосуванні методу ЕІЛ, автори [7] рекомендують використовувати в якості електроду-інструменту (ЕІ) прутки з ніхрому Х20Н80.

Крім значних переваг метод ЕІЛ має і недоліки: обмеження товщини і нерівномірність нанесеного шару, підвищення шорсткості поверхні, зниження утомної міцності [17]. Недоліки ЕІЛ усуваються за рахунок об'єднання з іншими екологічно безпечними, мало затратними і ефективними технологіями: поверхневим пластичним деформуванням (ППД), в якості якого останнім часом все більше використовують метод безабразивної фінішної обробки (БУФО) [18] і нанесення металополімерних матеріалів (МПМ), які додатково можуть армуватись порошком з зносостійких матеріалів, наприклад, з карбіду вольфраму, WC [17, 19].

Для захисту проти гідроабразивного зносу деталей з високоміцного чавуну перспективними можуть бути покриття нанесені методом ЕІЛ коли в якості ЕІ використовують матеріали, що складаються з тонкодисперсної суміші 1М (70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% B) та ВК6. Покриття складу 90% ВК6 + 10% 1М дозволяють формувати поверхневий шар на сталевих поверхнях з мікротвердістю до 14200 МПа [20]. Для покращення властивостей МПМ в якості матеріалу для армування можна використовувати порошок з нітриду цирконію, який характеризується високою температурою плавлення, твердістю та міцністю. Крім цього нітрид цирконію використовують для захисних зносостійких покриттів виробів, які працюють в агресивних середовищах. Також нітрид цирконію, серед інших мононітридів перехідних металів має найкращу корозійну стійкість [21].

Отже, виникає як науковий, так і практичний інтерес провести порівняльні дослідження зносостійкості покриттів, складу (90% ВК6 + 10% 1М), сформованих на поверхнях з високоміцного чавуну способом, який би підвищив здатність поверхневого шару деталей з ВЧ чинити опір зношуванню, гарантував би надійність і довговічність їх роботи в агресивних середовищах, був би екологічно безпечним і скоротив витрати на їх виготовлення.

Найближчим аналогом запропонованої технології, є спосіб формування покриття на поверхнях сталних деталей, який виконують наступним чином. Перед нанесенням комбінованого електроіскрового покриття (КЕП) поверхню деталі шліфують до Ra=0,5 мкм. Потім проводять цементацію шліфованої поверхні деталі методом ЕІЛ (ЦЕІЛ). Після виконують алітування цементованого шару алюмінієвим електродом з подальшим нанесенням на нього електроіскрового покриття електродом з твердого сплаву Т15К6. Далі поверхню сформованого КЕП піддають ППД методом обкатки кулькою (ОК). Після полімеризації металополімерним матеріалом, армованим при полімеризації порошком тврдосплавної суміші ВК6, частину шару металополімерного матеріалу видаляють до виступів шорсткості покриття з твердого сплаву Т15К6 [22]

Недоліками даного способу є:

- дуже складна технологія формування покриття;
- висока вартість використання технології;
- спосіб придатний тільки для деталей тіл обертання;
- недостатній захист сталевих поверхонь від гідроабразивного зношування.

Слід відмітити що поверхневий шар деталі з ВЧ непотрібно насичувати вуглецем, тобто проводити ЦЕІЛ.

Таким чином, метою дійсної роботи є удосконалення технології захисту деталей з ВЧ від гідроабразивного зносу шляхом нанесення на їх поверхні комбінованих покриттів в послідовності ЕІЛАІ → ЕІЛ (90%ВК6+10%1М) → МПМ, армованих порошком карбіду вольфраму, або нітриду цирконію, або їх сумішшю і проведення порівняльних іспитів.

#### Методика досліджень

Апробацію запропонованої технології формування КЕП, виконували на зразках з ВЧ з кулястим графітом ВЧ60. Для проведення порівняльних досліджень проти гідроабразивного зносу

виготовляли чавунні зразки, розміром 15x15x8 мм, на які наносили покриття електродами-інструментами на установці "Елітрон-52А" згідно з №3-6 (табл. 1).

Табл. 1

**Зразки з ВЧ60 для порівняльних досліджень проти гідроабразивного зношування**

№ зразка	Вид зміцнення
1	Без покриття
2	ЦЕЛІ → ЕІАІ → ЕІЛТ15К6 → обкатка кулькою (ОК) → МПМ (армований ВК6).
3	ЕІАІ → ЕІЛ (90%ВК6+ 10%ІМ).
4	ЕІАІ → ЕІЛ (90%ВК6+ 10%ІМ) → МПМ, армований порошком 80%WC
5	ЕІАІ → ЕІЛ (90%ВК6+ 10%ІМ) → МПМ, армований порошком 80%ZrN.
6	ЕІАІ → ЕІЛ (90%ВК6+ 10%ІМ) → МПМ, армований порошком 40%WC+ 40%ZrN.

\* зразок №2 зі сталі 12Х18Н10Т.

Для порівняння стійкості зразків проти гідроабразивного зносу використовували зразки зі сталі 12Х18Н10Т, з покриттям, сформованим, згідно з прототипом (№2, табл. 1). При цьому ЕІЛ шліфованої поверхні виконували на установці "Елітрон-52А" графітовим електродом МПГ-7 при енергії розряду  $W_p=3,4$  Дж. Далі на цій же установці проводили алітування цементованого шару алюмінієвим електродом (три проходи при  $W_p=3,4$  Дж) і нанесення покриття електродом з твердого сплаву Т15К6, виконуючи два проходи при  $W_p=0,9$  Дж і два проходи при  $W_p=3,4$  Дж. ОК виконували за три проходи з питомим зусиллям вигладжування  $P=2500$  МПа. На покриття з твердого сплаву Т15К6, ретельно втираючи, наносили МПМ, попередньо армований порошком у вигляді твердосплавної суміші ВК6, доданої в двокомпонентну епоксидну систему, наповнену феросиліконом марки Loctite 3478 при концентрації армуючої речовини  $\sim 60\%$ . Після полімеризації шар МПМ шліфували до виступів шорсткості покриття з твердого сплаву Т15К6.

Нанесення КЕП на шліфовані поверхні чавунних зразків №3-6 (табл. 1) виконували на установці "Елітрон-52А" алюмінієвим електродом (три проходи при  $W_p=3,4$  Дж) і ЕІ з композиційного зносостійкого матеріалу 90%ВК6+10%ІМ. На покриття складу 90%ВК6+10%ІМ, нанесене методом ЕІЛ, ретельно втираючи, наносили МПМ, попередньо армований порошком WC (№ 4, табл. 1), ZrN (№5, табл. 1) і їх суміші (№6, табл. 1), доданих в двокомпонентну епоксидну систему, наповнену феросиліконом марки Loctite 3478 при концентрації армуючої речовини, відповідно  $\sim 80\%$  WC; 80% ZrN і 40% WC+40% ZrN. Частину шару металополімерного матеріалу видаляли шліфуванням до виступів шорсткості покриття з композиційного зносостійкого матеріалу 90%ВК6+10%ІМ.

Для проведення випробувань зразків на зносостійкість проти гідроабразивного зношування було розроблено конструкцію та виготовлено дослідну установку [23]. Як абразивний матеріал використовували водну суміш піску з розміром частинок 0,1- 0,5 мм і концентрацією 100 г/л. Дослідження проводили протягом 24 годин.

Зразки фіксувалися на диску за допомогою утримувачів. Кріплення тримача диска дозволяє змінювати кут зустрічі зразка з абразивом. У процесі випробувань зразки, закріплені під кутом  $45^\circ$  оберталися зі швидкістю 120 об/хв.

**Результати досліджень**

При проведенні порівняльних досліджень зразків з високоміцного чавуну ВЧ60 на гідроабразивний знос, встановлено, що найінтенсивніше зношуються зразки без покриття (табл. 2, рис. 1).

Для високоміцного чавуну ВЧ60 найкращі результати з гідроабразивної зносостійкості показали зразки з покриттям, сформованим в послідовності: ЕІЛ АІ → ЕІЛ (90%ВК6+ 10%ІМ) → МПМ (80% ZrN), знос яких на 97,1% менше зразків без покриття, на 44,1% менше в порівнянні з прототипом (зразками зі сталі 12Х18Н10Т) і відповідно, на 5,9 і 14,7% менше сформованих в послідовності ЕІАІ → ЕІЛ (90%ВК6+10%ІМ) → МПМ (40%WC+40%ZrN) і в послідовності ЕІАІ → ЕІЛ (90%ВК6+10%ІМ) → МПМ (80% WC).

**Висновки:**

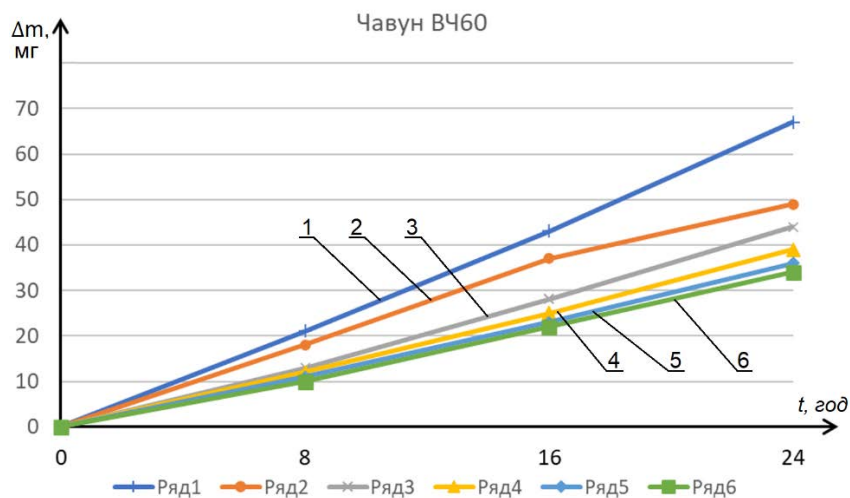
1. Запропонована нова технологія захисту деталей з ВЧ марки ВЧ60, шляхом нанесення зносостійких КЕП, яка полягає в ЕІЛ їх поверхні алюмінієвим ЕІ при  $W_p=3,4$  Дж з подальшим нанесенням при  $W_p=3,4$  Дж шару ЕІ з композиційного зносостійкого матеріалу 90%ВК6+10%1М. На сформоване покриття, ретельно втираючи, наносять МПМ, попередньо армований порошком WC, ZrN або їх сумішшю, доданих в двокомпонентну епоксидну систему, наповнену феросиліконом марки Loctite 3478 при концентрації армуючої речовини, відповідно ~ 80% WC; 80% ZrN і 40% WC+40%ZrN. Частину шару МПМ видаляють шліфуванням до виступів шорсткості покриття з КЕП- 90%ВК6+10%1М.

Табл. 2

**Результати досліджень гідроабразивного зношування зразків з високоміцного чавуну ВЧ60 з різними покриттями**

№ зразка	Вид покриття	Величина зносу, $\Delta m$ , мг/год		
		Час іспитів, год		
		8	16	24
1	Без покриття	21	43	67
2*	ЦЕІЛ → ЕІЛAl → ЕІЛТ15К6 → обкатка кулькою (ОК) → МПМ (ВК6) → ПД	18	37	49
3	ЦЕІЛ → ЕІЛAl → ЕІЛ (90%ВК6+ 10%1М)	13	28	44
4	ЕІЛAl → ЕІЛ (90%ВК6+ 10%1М) → МПМ (80% WC)	12	25	39
5	ЕІЛAl → ЕІЛ (90%ВК6+10%1М) МПМ (40%WC+ 40%ZrN)	11	23	36
6	ЕІЛAl → ЕІЛ (90%ВК6+10%1М) → МПМ (80% ZrN)	10	22	34

\* - зразок №2 зі сталі 12Х18Н10Т.



**Рис. 1. Результати досліджень гідроабразивного зношування зразків з високоміцного чавуну ВЧ60 (№3-6) і сталі 12Х18Н10Т (№2) з різними покриттями: 1 - без покриття; 2 - ЦЕІЛ → ЕІЛAl → ЕІЛТ15К6 → ОК → МПМ (ВК6) → ПД; 3 - ЕІЛAl → ЕІЛ (90%ВК6 + 10%1М); 4 - ЕІЛAl → ЕІЛ (90%ВК6+ 10%1М) → МПМ (80% WC); 5 - ЕІЛAl → ЕІЛ (90%ВК6+10%1М) → МПМ (40% WC+ 40%ZrN); 6 - ЕІЛAl → ЕІЛ (90%ВК6+10%1М) → МПМ (80% ZrN).**

2. Для високоміцного чавуну марки ВЧ60 найкращі результати з гідроабразивної зносостійкості показали зразки з покриттям, сформованим в послідовності: ЕІЛ Al → ЕІЛ (90%ВК6+ 10%1М) → МПМ (80% ZrN), знос яких на 97,1% менше зразків без покриття, на 44,1% менше в порівнянні з прототипом (зразками зі сталі 12Х18Н10Т) і відповідно, на 5,9 і 14,7% менше сформованих в послідовності ЕІЛAl → ЕІЛ (90%ВК6+10%1М) → МПМ (40%WC+40%ZrN) і в послідовності ЕІЛAl → ЕІЛ (90%ВК6+10%1М) → МПМ (80% WC).

**Список використаних джерел:**

1. Лалазарова Н.О., Дощечкіна І.В., Орлов М.С., Афанасьєва О.В., Покращення оброблюваності високоміцного чавуну використанням технологічних середовищ. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету: зб. наук. пр., 2020. – Вип. 91. С. 150–154.
2. Samotugina Yu.S., Lyashenko B. A., and Bezumova O.O., Influence of Plasma Modification Technology on Structure Formation Mechanisms and Wear Resistance of High Carbon Steels and Cast Irons, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 2021, 43, No. 8, С.1105–1119. (in Ukrainian), DOI: 10.15407/mfint.43.08.1105.
3. Шиліна О.П., Зміцнення сталевих та чавунних деталей терморегулюючими сумішами, *ВМТ*, вип. 2, 2017, с. 115–119.
4. Гурей Т.А. Підвищення зносостійкості чавунних деталей поверхневим зміцненням. Вестник ХНАДУ, 2016, вип. 74, –С.48-52.
5. Скобло Т.С., Сідашенко О.І., Сайчук О.В., Корпусні деталі з чавунів та їх якісні показники: Монографія / Т.С. Скобло, О.І. Сідашенко, О.В. Сайчук. Під ред. д.т.н. проф. Скобло Т.С. – Х: Діса плюс, 2019. – 282 с.
6. Патент України на корисну модель №105761 «Спосіб виробництва прокатних валків»: МПК В22D 23/00, В21В 27/00. u2015 07442. заявл. 24.07.2015.; опубл. 11.04.2016., Бюл. № 7.
7. Іванкова О. В., Гаращук О. В., Куценко В. І., Щербина В. В., Чижевський Д. В., Бабич Я. В., Тіхонов М.О., Дослідження методів відновлення зношених деталей сільськогосподарської техніки. Вісник ПДАА. 2020. № 4. С. 283–292.
8. Karakurkchi A. V., Functional properties of multicomponent galvanic alloys of iron with molybdenum and tungsten. *Functional Materials*, 2015, 22 (2), С. 181–187. doi: 10.15407/fm22.02.181
9. Yar-Mukhamedova G.S., Sakhnenko N.D., Ved' M.V., Yermolenko I.Y., & Zyubanova S.I., 2017 Surface analysis of Fe-Co-Mo electrolytic coatings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 213, 012019. doi: 10.1088/1757-899x/213/1/012019
10. Student M. M., Hvozdetzkyi V. M., Stupnytskyi T. R., & Dzioba Y. V., Development of Electrometallic Equipment and Newest Consumables for Applying Protective and Reductive Coatings to Parts of Machinery Used in Mining, Transport, and Food Processing Industries. *Science and Innovation*, 2017, 13 (6), С. 34–38. doi: 10.15407/scine13.06.034
11. Gvozdecki V.M., Electric arc restorative and protective coatings from cored wires. *Visnik Nacional'noi' Akademii' Nauk Ukraini*, 03, С. 79–84. doi: 10.15407/visn2018.03.079
12. Lyashenko B. A., Solovykh Ye. K., & Mirnenko, V. I., *Optimizatsiya tekhnologii naneseniya pokrytiy po kriteriyam prochnosti i iznosostoykosti*. Kiyev: IPP NAN Ukrainy, 2010.
13. Skoblo T.S., Rybalko N.N., Tykhonov A.V., & Martynenko, A.D., *Analyz sposobov yz-hotovlenyya, uprochnenyya y vosstanovlenyya lap kul'tyatora. Tekhnichnyy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta Transportnoho Kompleksiv*, 2019, 15, С. 60–85 [In Ukrainian].
14. Carcel B., Sampedro J., Ruescas A., & Toneu X. Corrosion and wear resistance improvement of magnesium alloys by laser cladding with Al-Si. *Physics Procedia*, 2011, 12, С. 353–363. doi: 10.1016/j.phpro.2011.03.045
15. Guzanova A., Džupon M., Draganovská D., Brezinová J., Viňáš J., Cmorej D., Janoško E., & Maruschak P., The corrosion and wear resistance of laser and mag weld deposits. *Acta Metallurgica Slovaca*, 2020, 26 (2), 37–41. doi: 10.36547/ams.26.2.557.
16. Burumkulov F. Kh., Lezin P. P., Senin P. V., Ivanov V. I., Velichko S. A., & Ionov P. A., *Elektroiskrovyye tekhnologii vosstanovleniya i uprochneniya detaley mashin i instrumentov (teoriya i praktika)*. Saransk: Krasnyy Oktyabr', 2003.
17. Tarelnyk V.B., Gaponova O.P., Loboda V.B., Konoplyanchenko E.V., Martsinkovskii V.S., Semirnenko Yu.I., Tarelnyk N.V., Mikulina M.A., Sarzhanov B.A., *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 57: 173 (2021). <https://doi.org/10.3103/S1068375521020113>
18. Tarelnyk V.B., Gaponova O.P., Konoplianchenko Ye.V., Martsynkovskyy V.S., Tarelnyk N. V., and Vasylenko O.O., Improvement of Quality of the Surface Electroerosive Alloyed Layers by the Combined Coatings and the Surface Plastic Deformation. III. The Influence of the Main Technological Parameters on Microgeometry, Structure and Properties of Electrolytic Erosion Coatings, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 41, No. 3: 313–335 (2019), <https://doi.org/10.15407/mfint.41.03.0313>

19. Tarel'nyk, V.B., Konoplianchenko, I.V., Gaponova, O.P., Sarzhanov, O.A., Antoszewski, B. Effect of Laser Processing on the Qualitative Parameters of Protective Abrasion-Resistant Coatings, Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 2020, 58(11-12), страницы 703–713.

20. Tarel'nik V.B., Paustovskii A.V., Tkachenko Y.G. et al., Electric-spark coatings on a steel base and contact surface for optimizing the working characteristics of babbitt friction bearings. Surf. Engin. Appl. Electrochem, 2017, 53, 285–294. <https://doi.org/10.3103/S1068375517030140>

21. Способ получения нитрида циркония Патент на изобретение РФ №2522601С1 / Е.В. Чаплина, Ю. И. Паутова, А. А. Громов.- 20.07. 29014г.

22. Tarel'nyk V., Konoplianchenko I., Gaponova O., Sarzhanov B. Assessment of Hydroabrasive Wear Resistance of Construction Materials with Functional Coatings, which are Formed by Resource-Saving and Environmentally Friendly Technologies. Key Engineering Materials. 2020. vol 864, p. 265–277. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.864.265>

23. Tarel'nyk V. B., Gaponova O. P., Melnyk V. I., Tarel'nyk N. V., Zubko V. M., Vlasovets V. M., Konoplianchenko Ie. V., Bondarev S. G., Radionov O. V., Mayfat M. M., Okhrimenko V. O., and Tkachenko A. V., The Surfaces Properties of Steel Parts with Wear-Resistant Coatings of the 1M and 90% BK6 + 10% 1M Composition Applied by the Method of Electrospark Alloying with the Use of Special Technological Environments. Pt. 1. The Strengthened-Surfaces' Structural State Features, 2023, т. 45, С. 683-706.

**Рецензент:** д.т.н., професор Шуляк М.Л.