

Н. В. ТАРЕЛЬНИК

кандидат економічних наук, доцент,
доцент кафедри проектування технічних систем
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-6304-6925

М. М. МАЙФАТ

аспірант кафедри технічного сервісу
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0009-0004-0563-929X

НОВИЙ СПОСІБ ЗАХИСТУ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ ВІД ГІДРОАБРАЗИВНОГО ЗНОСУ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИМИ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ МЕТОДАМИ

Метою дійсної роботи було підвищення довговічності сталевих деталей, шляхом розробки технології формування покриттів на зношувальних поверхнях, який би підвищив здатність чинити опір зношуванню, гарантував би надійність і довговічність їх роботи в агресивних середовищах, був би екологічно безпечним і скоротив витрати на їх виготовлення.

В статті запропонований новий екологічно безпечний спосіб захисту сталевих деталей від гідроабразивного зносу, який належить до галузі машинобудування і ремонту машин, зокрема до зміцнення сталевих деталей, і може бути використаний для їх захисту методом електроіскрового легування від гідроабразивного зносу.

Технологія використання нового способу полягає в наступному. Спочатку поверхні сталевих деталей шліфують до $Ra=0,5$ мкм, після чого на шліфованій поверхні формують електроіскрове покриття (ЕІП), здійснюючи цементацію шліфованої поверхні деталей методом електроіскрового легування (ЦЕІЛ), після цього використовують алітування цементованого шару методом ЕІЛ алюмінієвим електродом-інструментом з подальшим нанесенням на нього ЕІП електродом з композиційного зносостійкого матеріалу, отриманого за допомогою порошкової металургії (ПМ), складу $90\%VK6+10\%IM$, де $IM - 70\%Ni+20\%Cr+5\%V+5\%Si$. Далі поверхню сформованого комбінованого електроіскрового покриття піддають полімеризації металополімерним матеріалом (МПМ), армованим при полімеризації порошком карбиду вольфраму WC і/або нітриду цирконію ZnN або їх сумішшю $WC+ZnN$. Потім частину поверхневого шару МПМ видаляють до виступів шорсткості покриття з композиційного зносостійкого матеріалу $90\%VK6+10\%IM$.

До практичного використання, з метою захисту сталевих деталей від гідроабразивного зносу, пропонуються покриття, сформовані в послідовності ЦЕІЛ \rightarrow ЕІЛАІ \rightarrow ЕІЛ ($90\%VK6+10\%IM$) \rightarrow нанесення МПМ, армованого порошком WC , або ZnN , або їх сумішшю. Експериментально встановлено, що кращою стійкістю проти гідроабразивного зношування володіють зразки з корозійностійкої нержавіючої сталі 12Х18Н10Т, знос яких у порівнянні із зразками зі сталі 45 менший на 37,3 %.

Ключові слова: електроіскрове легування, гідроабразивний знос, деталь, абразивний знос, цементація, алітування, покриття, металополімерний матеріал.

N. V. TARELNYK

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Technical System Designs
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-6304-6925

M. M. MAYFAT

Postgraduate Student at the Department of Technical Service
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0009-0004-0563-929X

A NEW PROCESS TO PROTECT STEEL PARTS FROM HYDRO ABRASIVE WEAR USING ENVIRONMENTALLY SAFE TECHNOLOGICAL METHODS

The goal of this work was to achieve improved durability of steel parts by developing a technology for creating coatings on wear surfaces, which would increase the ability to make a stand against wear, guarantee the reliability and durability of their operation in aggressive media, be environmentally safe and reduce the cost of their production.

The paper proposes a new environmentally safe process for protecting steel parts from hydro abrasive wear. The process relates to the field of mechanical engineering and machine repair, in particular to strengthening of steel parts, and it can be used to protect them from hydro abrasive wear using electrospark alloying (ESA) method.

The technology based on the new process is as follows. First, the steel part surfaces are ground to $Ra = 0.5 \mu\text{m}$, then, while carburizing the ground surfaces of the part with the use of the electrospark alloying (ESA) method, the electrospark coating (ESC) is formed on the ground surface, after that there is performed an aluminizing process of the carburized layer using the ESA method by an aluminum electrode-tool with the subsequent application thereon of the electrospark coating (ESC) by the electrode-tool made of a wear-resistant composite material obtained using the powder metallurgy (PM) composition consisting of 90% VK6 + 10% 1M, where 1M is 70% Ni + 20% Cr + 5% B + 5% Si. Further, the surface of the formed combined electrospark coating is subjected to polymerization with a metal-polymer material (MPM), which has been being reinforced in the course of the polymerization process with tungsten carbide powder WC and/or zirconium nitride ZnN or their mixture WC+ZnN. Then a part of the surface layer of the MPM is removed until the appearance of the roughness protrusions of the coating made of the hydro resistant composite material of 90% VK6 + 10% 1M.

For practical use, in order to protect steel parts from hydro abrasive wear, there are proposed the coatings formed in the sequence of CESA → ESA Al → ESA (90% VK6 + 10% 1M) → application of MPM reinforced with WC powder, or ZnN, or a mixture thereof. It has been experimentally established that the samples made of the corrosion-resistant stainless steel of the 12X18H10T grade have the best resistance to hydro abrasive wear. As compared to the specimens made of steel 45, their wear is 37.3% less.

Key words: electrospark alloying, hydro abrasive wear, part, abrasive wear, carburizing, aluminizing, coating, metal-polymer material.

Постановка проблеми

У даний час для різних галузей промисловості (електроенергетики, паливної промисловості, чорної і кольорової металургії, космічної промисловості, хімічної і нафтохімічної промисловості, машинобудування і металообробки тощо), сільського та комунального господарства виготовляється, відновлюється і зміцнюється величезна кількість деталей. При цьому застосовуються різні технологічні методи як екологічно безпечні, так і такі, що негативно впливають на навколишнє середовище. Наприклад, при відновленні дискових робочих органів сільськогосподарських машин, виготовлених часто з листів сталей 65Г і 70Г з твердістю робочої зони дисків після термічної обробки HRC 35–45 при товщині леца 0,3–0,5 мм, можуть виконувати їх зміцнення, використовуючи наплавлення твердими і зносостійкими матеріалами, хіміко-термічну обробку (борування), зміцнення методом електроерозійної обробки, нанесення полімерних і композиційних матеріалів, плакування зносостійкою стрічкою, зміцнення накаткою, тощо [1].

Значна кількість технологій нанесення і різноманіття областей застосування покриттів і способів зміцнення поверхневих шарів деталей, широкий спектр матеріалів для цього, роблять непростим вибір більш раціонального способу підвищення параметрів якості їх поверхонь, особливо в умовах конкурентного підходу.

Багато різних деталей працює в важких умовах абразивного, гідроабразивного, корозійного та інших видів зносу, а методи їх виготовлення і ремонту дуже часто є негативними для людини та є екологічно небезпечними: зварювання, наплавлення, термічне напилення, ряд хіміко-термічних методів обробки, тощо.

Роботи направлені на удосконалення існуючих технологій і розробка нових методів відновлення і зміцнення поверхонь деталей, які працюють в важких умовах і підлягають впливу негативних середовищ, екологічно безпечними методами актуальні і своєчасні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Відомо спосіб електроіскрового легування (ЕІЛ), металевої поверхні, тобто, процес перенесення матеріалу на оброблювану поверхню іскровим електричним розрядом [2].

Спосіб ЕІЛ має ряд специфічних особливостей, однією з яких є те, що процес легування може відбуватися без перенесення матеріалу анода на поверхню катода і не створювати приросту матеріалу. Відбувається дифузійне насичення поверхні деталі складовими елементами (елементом) анода, наприклад, при ЕІЛ графітовим електроодом. Метод ЕІЛ графітовим електроодом базується на процесі дифузії (насиченні поверхневого шару деталі вуглецем) і має певну схожість з різновидом хіміко-термічної обробки (ХТО) – цементацією. У порівнянні з цементацією традиційним способом, ЕІЛ графітовим електроодом (ЦЕІЛ) не тільки має всі переваги порівнюваного методу, тобто забезпечує зміцнення поверхні деталі при збереженні властивостей вихідного матеріалу деталі, але і попереджає її деформування [3].

Однак, однією з характерних особливостей методу ЕІЛ є обмеження по товщині формованого поверхневого шару. Недостатньо відомостей про технології, які вирішують проблему відновлення робочих поверхонь деталей зі зносом від 0,2 мм і вище. Крім того, незважаючи на те, що ЕІЛ позитивно впливає на зносостійкість поверхневого шару, його застосування часто асоціюється зі збільшенням шорсткості поверхні виробів після ЕІЛ, нерівномірністю поверхневого зміцнення, негативним впливом електроіскрового розряду на утомні властивості виробів тощо.

Відомо спосіб відновлення поверхонь металевих деталей, що включає нанесення на зношену поверхню деталі покриття електроіскровим легуванням металевим електроодом, при якому покриття ЕІЛ наносять у режимах, що забезпечують задану шорсткість поверхні покриття, на отриману поверхню наносять принаймні один шар

металополімерного матеріалу (МПМ), забезпечують полімеризацію нанесеного шару МПМ, після чого його піддають фінішній обробці [4, 5].

Недоліками даного способу є:

- низька твердість металополімерних матеріалів;
- основне застосування способу, це відновлення деталей в нероз'ємних з'єднаннях (посадочних місць під підшипники, півмфти та ін.);
- металополімерні матеріали добре працюють на стиск і значно гірше на зрушення, що негативно впливає на їх застосування для відновлення у деталей поверхонь тертя;
- зміна властивостей під час підвищення температури на поверхнях тертя і ін.

Відомо спосіб підвищення зносостійкості сталевих деталей шляхом поетапного зміцнення методом ЕІЛ їх поверхневого шару, який включає ЦЕІЛ, алітування методом ЕІЛ алюмінієвим електродом і нанесення методом ЕІЛ зносостійкого покриття електродом-інструментом, виготовленим з матеріалу, вибраного з групи тугоплавких металів Ti, V, W і їх карбідів [6].

У даному способі при енергії розряду 3,4 Дж для нержавіючої сталі 12Х18Н10Т товщина шару підвищеної твердості становить 320–360 мкм, а мікротвердість зміцненого шару – 10000 МПа.

Недоліками даного способу є:

- недостатня товщина шару підвищеної твердості;
- невелика товщина покриття (до 0,2 мкм);
- висока шорсткість покриття ($R_a=7,5$ мкм).

Зазначені недоліки знижують здатність деталей чинити опір зношуванню, надійність і довговічність їх роботи в агресивних середовищах.

Найближчим аналогом є спосіб формування покриття на зношувальних поверхнях деталей, який включає підготовку поверхні деталі, нанесення на неї комбінованого електроіскрового покриття, поверхнево-пластичну деформацію (ППД) отриманого покриття і нанесення на нього металополімерного матеріалу (МПМ). Перед нанесенням комбінованого електроіскрового покриття поверхню деталі шліфують до $R_a=0,5$ мкм. При формуванні комбінованого електроіскрового покриття спочатку проводять ЦЕІЛ шліфованої поверхні деталі. Після виконують алітування цементованого шару алюмінієвим електродом з подальшим нанесенням на нього електроіскрового покриття електродом з твердого сплаву Т15К6. Далі поверхню сформованого комбінованого електроіскрового покриття піддають поверхнево-пластичній деформації методом обкатки кулькою (ОК). Після полімеризації металополімерним матеріалом, армованим при полімеризації порошком твердосплавної суміші ВК6, частину шару металополімерного матеріалу видаляють до виступів шорсткості покриття з твердого сплаву Т15К6 [7].

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.

Відомо зносостійке спечене покриття, в якому наповнювачем служить твердосплавна суміш ВК-6, а легкоплавким зв'язком – твердий розчин системи Ni-Cr-Si-B. Покриття наносять на поверхні деталей шлікерним методом з наступним відпадом у вакуумі.

З метою застосування як електродів при ЕІЛ нових композиційних зносостійких матеріалів, отриманих за допомогою порошкової металургії, досліджували матеріали, що складаються з тонкодисперсної суміші 1М (70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% B) та ВК6. Найбільш перспективним є легування електродом з матеріалу складу 90% ВК6 + 10% 1М, що дозволяє формувати поверхневий шар з мікротвердістю до 14200 МПа. При застосуванні електродів з тонкодисперсної суміші 1М мікротвердість досягає 11500 МПа. Підшар з індію, знижуючи шорсткість покриття (з $R_a = 3,5 \dots 4,2$ мкм до $R_a = 0,6 \dots 0,9$ мкм), незначно знижує його мікротвердість, але при цьому вона залишається на досить високому рівні, відповідно 13250 і 12250 МПа [8].

Таким чином, митою роботи є підвищення довговічності сталевих деталей, шляхом розробки технології формування покриттів на зношувальних поверхнях, який би підвищив здатність чинити опір зношуванню, гарантував би надійність і довговічність їх роботи в агресивних середовищах, був би екологічно безпечним і скоротив витрати на їх виготовлення.

Методика досліджень

Обґрунтування вибору матеріалу зразків для досліджень на стійкість проти гідроабразивного зносу.

Відповідно до [9], залежно від навколишнього середовища застосовують такі матеріали ротора та кожуха центрифуг для очищення стічних вод, які в процесі роботи підлягають дуже великому гідроабразивному зношуванню:

1) нелеговані чорні метали: допускається обробка при температурі до 45°C суспензій, що містять нейтральні та лужні солі, такі як нітрати натрію, кадмію, барію; анілінові барвники, солі кремнієвої, миш'якової та миш'яквистої кислот; сульфати та гідросульфати натрію, кальцію, магнію, цинку, барію, кальцію, кадмію;

2) корозійностійка сталь 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632-72), крім суспензій, перерахованих вище, допускається обробка при температурі не вище 70⁰С також суспензій, що містять: гідросульфат натрію, калію, кальцію; броміді та йодиди натрію та калію (до 30⁰С і до 10% мас.); солі міді всіх кислот, крім соляної; саліцилову кислоту (до 30⁰С); сульфіді металів; розчини сульфатів заліза та міді, що містять до 10% сірчаної кислоти; ацетати алюмінію, міді, свинцю; фосфати натрію, калію, кальцію, барію, стронцію, магнію, цинку (до 30⁰С).

Таким чином, для досліджень були обрані сталь 45 і корозійно-стійка нержавіюча сталь 12Х18Н10Т з яких виготовляли зразки розміром 15х15х8 мм, які підлягали ЦЕЛ і наступному алітуванню методом ЕЛ алюмінієвим електродом-інструментом і наступним легуванням електродом-інструментом з композиційного зносостійкого матеріалу 90%ВК6+10%1М на установці моделі «Елітрон-52А» (табл. 1).

Таблиця 1

Зразки сталі 45 і сталі 12Х18Н10Т для порівняльних випробувань проти гідроабразивного зношування

№ зразка	Вид зміцнення	Зображення	
		Сталь 45	Сталь 12Х18Н10Т
1	Без покриття		
2	ЦЕЛ → ЕЛAI → ЕЛТ15К6 → обкатка кулькою (ОК) → МПМ (армований ВК6).		
3	ЦЕЛ → ЕЛAI → ЕЛ (90%ВК6+ 10%1М).		
4	ЦЕЛ → ЕЛAI → ЕЛ (90%ВК6+ 10%1М) → МПМ, армований порошком 80%WC		
5	ЦЕЛ → ЕЛAI → ЕЛ (90%ВК6+ 10%1М) → МПМ, армований порошком 80%ZrN.		
6	ЦЕЛ → ЕЛAI → ЕЛ (90%ВК6+ 10%1М) → МПМ, армований порошком 40%WC+ 40%ZrN.		

Після цього на сформоване покриття наносили металополімерний матеріал, попередньо армований порошком у вигляді карбиду вольфраму WC або нітриду цирконію ZnN, або їх суміші WC+ZrN і після полімеризації частину шару металополімерного матеріалу видаляли шліфуванням до виступів шорсткості покриття з композиційного зносостійкого матеріалу 90%ВК6+10%1М.

Електроди з композиційного зносостійкого матеріалу 90%ВК6+10%1М, отримані за допомогою порошкової металургії і складаються з 10% тонкодисперсної суміші 1М – 70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% В та 90% суміші ВК6.

Порошки WC, ZrN та їх суміші додають в двокомпонентну епоксидну систему, наповнену феросиліконом марки Loctite 3478 в різних співвідношеннях (табл. 1):

- варіант 1: концентрація армувальної речовини WC становить ~ 80%;

- варіант 2: концентрація армувальної речовини ZrN становить ~ 80%;
- варіант 3: концентрація армувальної речовини суміші порошків WC + ZrN, становить 40% WC+40% ZrN.

Апробацію способу формування комбінованих електроерозійних покриттів виконували на зразках з вуглецевої конструкційної якісної сталі 45 ферито-перлітного класу та жароміцної, корозійностійкої конструкційної з аустенітною кристалічною структурою сталі 12X18H10T.

Для проведення порівняльних досліджень проти гідроабразивного зносу виготовляли сталеві зразки, розміром 15x15x8мм, на які наносили покриття електродами-інструментами на установці «Елітрон-52А» згідно з № 3–6 (табл. 1).

Для порівняння стійкості зразків проти гідроабразивного зносу використовували зразки з сталі 45 і сталі 12X18H10T з покриттям, сформованим, згідно з прототипом № 2 (табл. 1). При цьому електроіскрове легування 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.

Поверхнево-пластичну деформацію виконували за три проходи методом обкатки кулькою 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 ферросиліконом марки Loctite 3478 при концентрації армуючої речовини ~ 60%. Після полімеризації шар МПМ шліфували до виступів шорсткості покриття з твердого сплаву Т15К6.

Нанесення електроіскрового покриття на зразки № 3–6 (табл. 1) після ЦЕІЛ і алітування методом ЕІЛ виконували електродом-інструментом з композиційного зносостійкого матеріалу 90%ВК6+10%1М на установці «Елітрон-52А» при $W_p=3,4$ Дж. На покриття з композиційного зносостійкого матеріалу 90%ВК6+10%1М, ретельно втираючи, наносили МПМ, попередньо армований порошком у вигляді карбиду вольфраму № 4, нітриду цирконію № 5 і їх суміші № 6, (табл. 1), доданих в двокомпонентну епоксидну систему, наповнену ферросиліконом марки Loctite 3478 при концентрації армуючої речовини, відповідно ~ 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%1М.

Слід відмітити, що композиційний зносостійкий матеріал 90%ВК6+10%1М можна наносити при енергії розряду, $W_p=0,13-3,4$ Дж. Зменшення енергій розряду нижче $W_p=0,13$ Дж недоцільно в зв'язку з низькою продуктивністю. Збільшення енергій розряду вище ніж $W_p=3,4$ Дж призводить до різкого зниження суцільності покриття.

Для проведення випробувань зразків на зносостійкість проти гідроабразивного зношення було розроблено конструкцію та виготовлено дослідну установку. 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.

Результати досліджень

Нижче представлені результати проведення досліджень зразків зі сталі 45 і сталі 12X18H10T на гідроабразивний знос.

Оцінка гідроабразивної зносостійкості зразків із сталі 45

В результаті проведених досліджень встановлено, що найінтенсивніше зношуються зразки без покриття (рис. 1, табл. 2).

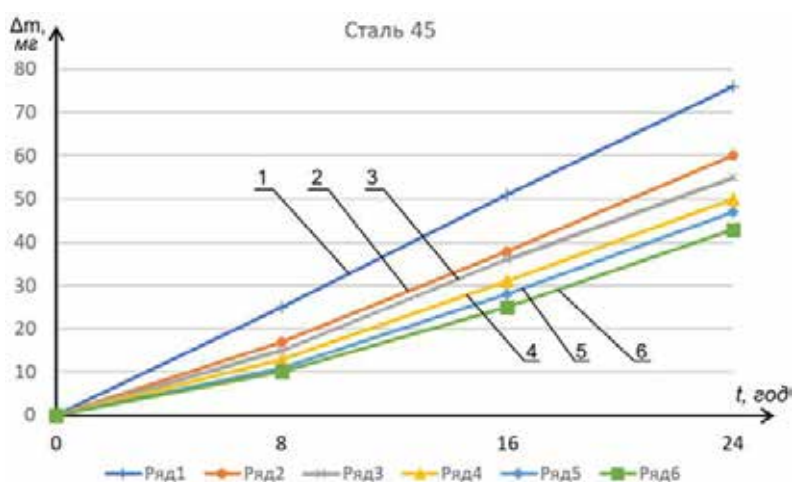


Рис. 1. Результати гідроабразивного зношення зразків зі сталі 45 з різними покриттями: № 1–6, згідно таблиці 2

Зразки № 6 з покриттям, сформованим в послідовності: ЦЕЛІ → ЕЛІАІ → ЕЛІ (90%ВК6+10%1М) → МПМ (80% ZrN), знос яких на 76,7% менше зразків без покриття, на 39,5% менше в порівнянні з прототипом (№ 2) і, відповідно, на 9,3 (№ 5) і на 16,3 (№ 4) %, менше сформованих в послідовності ЦЕЛІ → ЕЛІАІ → ЕЛІ (90%ВК6+10%1М) → МПМ (40%WC+40%ZrN) і ЦЕЛІ → ЕЛІАІ → ЕЛІ (90%ВК6+10%1М) → МПМ (80% WC).

Таблиця 2

Результати досліджень гідроабразивного зношування зразків зі сталі 45 з різними покриттями

№ зразка	Вид покриття	Величина зносу, Δm, мг		
		8 год	16 год	24 год
1	Без покриття	25	51	76
2	ЦЕЛІ → ЕЛІАІ → ЕЛІТ15К6 → обкатка кулькою (ОК) → МПМ (ВК6) → (ПД)	17	38	60
3	ЦЕЛІ → ЕЛІАІ → ЕЛІ (90%ВК6+ 10%1М)	15	36	55
4	ЦЕЛІ → ЕЛІАІ → ЕЛІ (90%ВК6+ 10%1М) → МПМ (80% WC)	13	31	50
5	ЦЕЛІ → ЕЛІАІ → ЕЛІ (90%ВК6+ 10%1М) → МПМ (40%WC+ 40%ZrN)	11	28	47
6	ЦЕЛІ → ЕЛІАІ → ЕЛІ (90%ВК6+10%1М) → МПМ (80% ZrN)	10	25	43

Оцінка гідроабразивної зносостійкості зразків із сталі 12Х18Н10Т

При проведенні порівняльних досліджень зразків із сталі 12Х18Н10Т на гідроабразивний знос протягом 24 годин характер розподілу їх за ранжиром, згідно з стійкістю проти гідроабразивного зносу співпадає зі зносом зразків зі сталі 45. Тут також найінтенсивніше зношуються зразки без покриття (рис. 2, табл. 3).

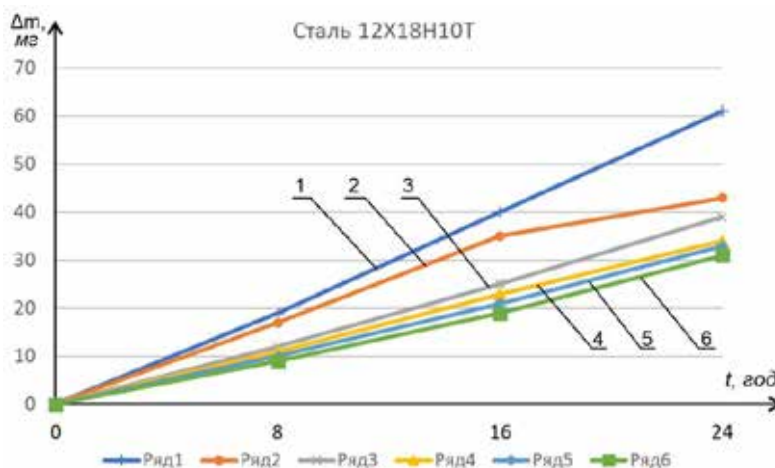


Рис. 2. Результати гідроабразивного зношування зразків зі сталі 12Х18Н10Т з різними покриттями: № 1–6, згідно таблиці 3

Таблиця 3

Результати досліджень гідроабразивного зношування зразків зі сталі 12Х18Н10Т з різними покриттями

№ зразка	Вид покриття	Величина зносу, Δm, мг		
		8 год	16 год	24 год
1	Без покриття	19	40	61
2	ЦЕЛІ → ЕЛІАІ → ЕЛІТ15К6 → обкатка кулькою (ОК) → МПМ (ВК6) → пластичне деформування (ПД)	17	35	43
3	ЦЕЛІ → ЕЛІАІ → ЕЛІ (90%ВК6+ 10%1М)	12	25	39
4	ЦЕЛІ → ЕЛІАІ → ЕЛІ (90%ВК6+ 10%1М) → МПМ (80% WC)	11	23	34
5	ЦЕЛІ → ЕЛІАІ → ЕЛІ (90%ВК6+10%1М) → МПМ (40%WC+ 40%ZrN)	10	21	33
6	ЦЕЛІ → ЕЛІАІ → ЕЛІ (90%ВК6+10%1М) → МПМ (80% ZrN)	9	19	31

Для сталі 12Х18Н10Т найкращі результати з гідроабразивної зносостійкості показали зразки з покриттям, сформованим в послідовності: ЦЕЛІ → ЕЛІАІ → ЕЛІ (90%ВК6+ 10%1М) → МПМ (80% ZrN), знос яких на 96,7% менше зразків без покриття, на 38,7% менше в порівнянні з аналогом і, відповідно, на 6,5 і на 9,7%, менше сформованих в послідовності ЦЕЛІ → ЕЛІАІ → ЕЛІ (90%ВК6+10%1М) → МПМ (40%WC+40%ZrN) і сформованим в послідовності ЦЕЛІ → ЕЛІАІ → ЕЛІ (90%ВК6+10%1М) → МПМ (80% WC).

Висновки

1. Для захисту сталених деталей від гідроабразивного зносу можна рекомендувати покриття, нанесені в послідовності ЦЕІЛ → ЕІЛІАІ → ЕІЛ (90%ВК6+10%ІМ) → МПМ, армовані порошком карбиду вольфраму, або нітриду цирконію, або їх сумішшю. Запропонована технологія забезпечує підвищення здатності деталей чинити опір зношуванню, гарантує надійність і довговічність їх роботи в агресивних середовищах, екологічну безпеку і скорочення витрат на їх виготовлення.

2. Кращою стійкістю проти гідроабразивного зношування мають зразки з корозійностійкої нержавіючої сталі 12Х18Н10Т, з покриттями сформованим в послідовності: ЦЕІЛ → ЕІЛІАІ → ЕІЛ (90%ВК6+ 10%ІМ) → МПМ (80% ZrN), знос яких на 96,7% менше зразків без покриття, на 38,7% менше в порівнянні з аналогом і, відповідно, на 6,5 і на 9,7%, менше покриттів, металополімерні матеріали яких, армовані сумішшю (40%WC+40%ZrN) і 80% WC).

3. Кращий спротив гідроабразивному зношуванню мають зразки з корозійностійкої нержавіючої сталі 12Х18Н10Т, знос яких у порівнянні із зразками зі сталі 45 менший на 37,3%.

Список використаної літератури

1. Тарельник В.Б., Саржанов Б.О., Гапон О.О. Новий спосіб відновлення і зміцнення деталей з листової сталі, що піддаються в процесі експлуатації абразивному зносу. *Вісник Сумського національного аграрного університету*. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів». 2019. Вип. 1–2 (35–36). С. 18–24.

2. Tarelnik V.B., Gaponova O.P., Konoplyantschenko E.V., Yevtushenko N.S., Gerasimenko V.A., The Analysis of a Structural State of Surface Layer after Electroerosive Alloying. II. Features of Formation of Electroerosive Coatings on Special Steels and Alloys by Hard Wear-Resistant and Soft Antifriction Materials. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 2018, 40, No.6, 795.

3. Cementation of steel details by electrospark alloying Tarelnyk, V.B., Gaponova, O.P., Kirik, G.V., ... Tarelnyk, N.V., Mikulina, M.O. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 2020, 42(5), С. 655–667.

4. Пат. 104664 UA, МПК В23Н 5/00, В23Н 9/00, С23С 28/00 (2014.01) Спосіб відновлення зношених поверхонь металевих деталей / Марцинковський В. С., Тарельник В. Б., Павлов О. Г., Іщенко А. О. ; заявл. 14.08.2012 ; опубл. 25.02.2014, Бюл. № 4, 2014.

5. Tarelnyk 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), С. 703–713.

6. Пат. на корисну модель 136895 UA, МПК В23Н 9/00, С23С 8/60 (2006.01), С23С 10/48 (2006.01) Спосіб підвищення зносостійкості сталевих деталей / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко С. В., Тарельник Н. В., Саржанов О. А., Саржанов Б. О., Антошевський Б. ; заявл. 02.04.2019 ; опубл. 10.09.2019, Бюл. № 17, 2019.

7. Tarelnyk 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>

8. Tarelnik, 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, С. 285–294. <https://doi.org/10.3103/S1068375517030140>

9. Саржанов Б.О. Розробка екологічно безпечних методів відновлення шнеків машин технологічного циклу утилізації гною. – Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 13 – Механічна інженерія за спеціальністю 133 – Галузеве машинобудування. – Сумський національний аграрний університет, Суми, 2021.

References

1. Tarelnyk V.B., Sarzhanov B.O., Hapon O.O. (2019) Novyi sposib vidnovlennia i zmitsnennia detalei z lystovoi stali, shcho piddaiutsia v protsesi ekspluatatsii abrazyvnomu znosu. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu*, vol. 1–2 (35–36), pp. 18–24.

2. Tarelnik V.B., Gaponova O.P., Konoplyantschenko E.V., Yevtushenko N.S., Gerasimenko V.A. (2018) The Analysis of a Structural State of Surface Layer after Electroerosive Alloying. II. Features of Formation of Electroerosive Coatings on Special Steels and Alloys by Hard Wear-Resistant and Soft Antifriction Materials. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, vol. 40, no. 6, p. 795.

3. Tarelnyk, V.B., Gaponova, O.P., Kirik, G.V., Tarelnyk, N.V., Mikulina, M.O. (2020) Cementation of steel details by electrospark alloying *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, vol. 42(5), pp. 655–667.

4. Martsynkovskiy V. S., Tarelyk V. B., Pavlov O. H., Ishchenko A. O. (2014). Sposib vidnovlennia znoshenykh poverkhon metalevykh detalei (Patent Ukrainy № 104664). Derzhavna sluzhba intelektualnoi vlasnosti Ukrainy. <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=274106>
5. Tarelyk V.B., Konoplianchenko I.V., Gaponova O.P., Sarzhanov O.A., Antoszewski B. (2020) Effect of Laser Processing on the Qualitative Parameters of Protective Abrasion-Resistant Coatings. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics.*, vol. 58(11–12), pp. 703–713.
6. Tarelyk V. B., Martsynkovskiy V. S., Haponova O. P., Konoplianchenko Ye. V., Tarelyk N. V., Sarzhanov O. A., Sarzhanov B. O., Antoshevskiy B. (2019). Sposib pidvyshchennia znosostiikosti stalevykh detalei. (Patent Ukrainy № 136895). Derzhavna sluzhba intelektualnoi vlasnosti Ukrainy. <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=261777>
7. Tarelyk V., Konoplianchenko I., Gaponova O., Sarzhanov B. (2020) Assessment of Hydroabrasive Wear Resistance of Construction Materials with Functional Coatings, which are Formed by Resource-Saving and Environmentally Friendly Technologies. *Key Engineering Materials.* vol 864, pp. 265–277. Retrieved from: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.864.265>
8. Tarel'nik, V.B., Paustovskii, A.V., Tkachenko, Y.G. et al. (2017) Electric-spark coatings on a steel base and contact surface for optimizing the working characteristics of babbitt friction bearings. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.* vol 53, pp. 285–294. <https://doi.org/10.3103/S1068375517030140>
9. Sarzhanov B.O. (2021). Rozrobka ekolohichno bezpechnykh metodiv vidnovlennia shnekiv mashyn tekhnolohichnoho tsykladu utylizatsii hnoiu. – Dysertatsiia na zdobuttia naukovooho stupenia doktora filosofii z haluzi znan 13 – Mekhanichna inzheneriia za spetsialnistiu 133 – Haluzeve mashynobuduvannia. – Sums'kyi natsionalnyi ahraryi universytet, Sumy [in Ukrainian].