

ТАРЕЛЬНИК В. Б., ДОЦЕНКО А. О., МОТУЗНИЙ М. М.

ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЗАХИСНИХ ВТУЛОК САЛЬНИКОВИХ УЩІЛЬНЕНЬ НАСОСІВ, ПРАЦЮЮЧИХ В УМОВАХ ПІДВИЩЕНОЇ КОРОЗІЙНОЇ І АБРАЗИВНОЇ АКТИВНОСТІ

Метою роботи є підвищення ефективності вузла сальникового ущільнення (СУ) відцентрового насоса, працюючого в важких умовах корозійного і абразивного впливу, притаманному меліоративним системам, шляхом нанесення на поверхню захисної втулки (ЗВ) комбінованого композиційного покриття (ККП), за рахунок послідовного використання екологічно безпечних методів: цементації електроіскровим легуванням (ЦЕЛІ) + нанесення металополімерного матеріалу (МПМ) + обробка металоріжучим інструментом (МІ) + безабразивна ультразвукова фінішна обробка (БУФО).

Задачами дослідження були: оцінка впливу різних матеріалів ЗВ на знос та визначення впливу ККП на величину зносу поверхні ЗВ.

Авторами запропонований новий спосіб захисту поверхневих шарів ЗВ СУ насосів, працюючих в важких умовах меліоративних систем, від корозійного і абразивного зношування, який полягає в формуванні на їх поверхнях ККП, нанесених в послідовності: ЦЕЛІ + МПМ + обробка МІ + БУФО, що значно збільшує здатність опиратися зношуванню, та гарантує більш надійну роботу в агресивних середовищах. Матеріали досліджуваних зразків по стійкості проти корозійного і абразивного зношування розподіляються в ряд: 30X13, 12X18H10T і 40X. Металеві порошки, які використовують при армуванні ПМ, по ступеню забезпечення найменшого зносу розподіляються в послідовності: порошок нітриду цирконію, порошок карбіду вольфраму і нікелю. Шорсткість поверхневого шару зразків, виконаних зі сталі 30X13 з ККП, в яких для армування ПМ використовували порошок з нітриду цирконію, після 24 годин іспитів, складає $Ra = 2,2$ мкм, що відповідно на 4,5 і 40,1 % краще ніж при використанні порошоків з карбіду вольфраму і нікелю. Динаміка зношування сталевих зразків, під дією корозії і абразивних часток, характеризується збільшенням з часом її ефективності, що більш відображається на зразках з покриттями, які поступово втрачають вплив на процес зношування властивостей ККП (твердості і захисту від корозії). У зразків без покриттів, з часом на поверхні збільшується кількість зруйнованих ділянок і інтенсивність зношування, хоч і значно менш ніж у зразків без покриття, але вона також має місце. В першому наближенні графіки зношування зразків зі сталі 30X13, 12X18H10T і 40X, як з покриттями так і без покриттів, нагадують експоненційно зростаючу залежність.

Ключові слова: електроіскрове легування, сальникове ущільнення, захисна втулка, металополімерні матеріали, металорізальний інструмент, знос, твердість, шорсткість, екологічна безпека.

TARELNYK V., DOTSENKO A., MOTUZNYI M.

IMPROVING THE WEAR RESISTANCE OF PROTECTIVE SLEEVES OF PACKING SEALS IN PUMPS OPERATING UNDER CONDITIONS OF INCREASED CORROSIVE AND ABRASIVE ACTIVITY

The aim of this work is to increase the efficiency of the packing seal unit (PS) of a centrifugal pump operating under severe conditions of corrosive and abrasive impact typical of reclamation systems, by applying a combined composite coating (CCC) to the surface of the protective sleeve (PS). This is achieved through the sequential use of environmentally safe methods: cementation by electrospark alloying (CESA) + application of a metal-polymer material (MPM) + machining with a metal-cutting tool (MCT) + non-abrasive ultrasonic finishing treatment (NAUFT).

The objectives of the study were to evaluate the influence of different protective sleeve materials on wear and to determine the effect of the CCC on the magnitude of wear of the protective sleeve surface.

The authors propose a new method for protecting the surface layers of protective sleeves of pump packing seals operating under severe conditions of reclamation systems from corrosive and abrasive wear. The method consists in forming a CCC on their surfaces applied in the following sequence: CESA + MPM + machining with an MCT + NAUFT. This significantly increases wear resistance and ensures more reliable operation in aggressive environments. According to resistance to corrosive and abrasive wear, the materials of the investigated samples are ranked as follows: 30Kh13, 12Kh18N10T, and 40Kh steels. Metal powders used for reinforcing the polymer material, in terms of ensuring minimal wear, are arranged in the sequence: zirconium nitride powder, tungsten carbide powder, and nickel powder. The surface roughness of samples made of 30Kh13 steel with a CCC, in which zirconium nitride powder was used for polymer reinforcement, after 24 hours of testing is $Ra = 2.2$ μm , which is respectively 4.5% and 40.1% better than when using tungsten carbide and nickel powders. The wear dynamics of steel samples under the action of corrosion and abrasive particles are characterized by an increase in wear intensity over time, which is more pronounced in coated samples that gradually lose the influence of the CCC properties (hardness and corrosion protection) on the wear process. In uncoated samples, the number of damaged areas on the surface and the wear intensity increase over time; although this increase is significantly smaller than in coated samples, it is still present. As a first approximation, the wear curves of samples made of 30Kh13, 12Kh18N10T, and 40Kh steels, both with and without coatings, resemble an exponentially increasing dependence.

Keywords: electrospark alloying, packing seal, protective sleeve, metal-polymer materials, metal-cutting tool, wear, hardness, surface roughness, environmental safety.

ТАРЕЛЬНИК В. Б., ДОЦЕНКО А. А., МОТУЗНИЙ М. М.

ПОВЫШЕНИЕ ЗНОСТОЙКОСТИ ЗАЩИТНЫХ ВТУЛОК САЛЬНИКОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ НАСОСОВ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОЙ КОРРОЗИОННОЙ И АБРАЗИВНОЙ АКТИВНОСТИ

Целью работы является повышение эффективности узла сальникового уплотнения (СУ) центробежного насоса, работающего в тяжелых условиях коррозионного и абразивного воздействия, присущие меліоративным системам, путем нанесения на поверхность защитной втулки (ЗВ) комбинированного композиционного покрытия (ККП), за счет последовательного использования экологически безопасных методов: цементации электроискровым легированием (ЦЭИЛ) + нанесение металлополимерного материала (МПМ) + обработка металлорежущим инструментом (МИ) + безабразивная ультразвуковая финишная обработка (БУФО).

Задачами исследования были: оценка влияния различных материалов ЗВ на износ и определение влияния ККП на величину износа поверхности ЗВ.

Авторами предложен новый способ защиты поверхностных слоев ЗВ СУ насосов, работающих в тяжелых условиях меліоративных систем, от коррозионного и абразивного износа, который заключается в формировании на их поверхностях ККП, нанесенных в последовательности: ЦЭИЛ + МПМ+ обработка МИ + БУФО, что значительно увеличивает способность сопротивляться износу и гарантирует более надежную работу в агрессивных средах. Материалы изучаемых образцов по стойкости против коррозионного и абразивного износа распределяются в ряд: 30X13, 12X18H10T и 40X.

Металлические порошки, используемые при армировании ПМ, по степени обеспечения наименьшего износа распределяются в последовательности: порошок нитрида циркония, порошок карбида вольфрама и никеля. Шероховатость поверхностного слоя образцов, выполненных из стали 30X13 из ККП, в которых для армирования ПМ использовали порошок из нитрида циркония, после 24 часов испытаний, составляет $Ra = 2,2$ мкм, что соответственно на 4,5 и 40,1 % лучше, чем при использовании порошков из карбида вольфрама и никеля. Динамика износа стальных образцов, под действием коррозии и абразивных частиц, характеризуется увеличением со временем ее эффективности, что более отражается на образцах с покрытиями, которые постепенно теряют влияние на процесс износа свойств ККП (твердости и защиты от коррозии). У образцов без покрытий, со временем на поверхности увеличивается количество разрушенных участков и интенсивность износа, хотя и значительно меньше, чем у образцов без покрытия, но также имеет место. В первом приближении графики износа образцов из стали 30X13, 12X18H10T и 40X, как с покрытиями, так и без покрытий, напоминают экспоненциально растущую зависимость.

Ключевые слова: электроискровое легирование, сальниковое уплотнение, защитная втулка, металлополимерные материалы, металлорежущий инструмент, износ, твердость, шероховатость, экологическая безопасность.

Вступ. В роторных насосах, працюючих в важких умовах меліоративних систем, одним з відповідальних вузлів, від якого залежить термін їх ефективної роботи насосу є сальникове ущільнення (СУ). Висновками досліджень, проведених асоціацією ущільнень в Західній Європі, майже в 85% насосів використовуються СУ [1], які позитивно відрізняються не тільки простотою конструкцією, а також низькою вартістю виготовлення.

Конструктивні особливості вузла СУ детально описані в [2], а схема представлена на рисунку 1.

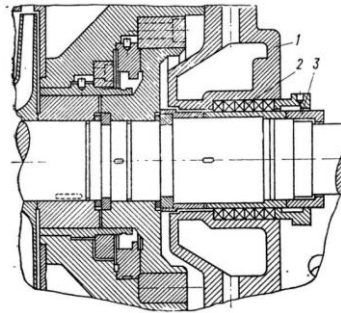


Рис. 1. – Схематичне зображення конструкції вузла СУ: 1 – корпус; 2 – розрізні кільця сальника; 3 – ЗВ [2]

Сальникова набивка виготовляється з міцного еластичного матеріалу, який повинен володіти антифрикційними і мастильними властивостями, протистояти розчиненню, розбуханню і розм'якшенню в робочому середовищі і не втрачати своїх властивостей в умовах підвищення температури. Сальникова набивка розташована у корпусі (1) у вигляді розрізних кілець (2), які стискаються в осевому напрямку і завдяки цьому тиснуть з одного боку на захисну втулку (ЗВ) (3), а з іншого на стінки корпусу. В результаті забезпечується потрібна герметичність.

Коли насос працює, то поверхневі шари окремих його деталей контактують з рідиною, яку він перекачує. Під час роботи насосу в меліоративних системах, в рідині, як правило, присутні абразивні частки. Також рідина може бути кислою або їдкою, коли в ній присутні розчинені мінеральні добрива, або речовина, яка попадає під час обробки шкідників рослин. Рідина зношує поверхню ЗВ внаслідок дії абразивних часток, частина з яких залишає на поверхні втулки окремі подряпини, а інша частина впроваджується в поверхневі шари сальника і деякий час шаржує поверхню. Крім цього поверхня ЗВ підлягає негативному, корозійному впливу від оточуючого середовища, яке складається з рідких агрономічних препаратів, тощо.

Таким чином, підвищення зносостійкості поверхневих шарів ЗВ, працюючих в важких умовах абразивного і корозійного зношування актуальні.

Аналіз основних досягнень та літератури. Сучасне машинобудування має в своєму запасі дуже велику кількість методів захисту поверхневих шарів деталей від зношування. Найбільш розповсюдженими є методи хіміко-термічної обробки (ХТО), з яких основними є методи насичення поверхневих шарів деталей елементами вуглецю (цементация) азоту (азотування) та одночасного насичення вуглецем і азотом (нітроцементация) [3-5].

Незважаючи на низку позитивних змін в поверхневих шарах деталей при ХТО, існують і значні недоліки методу. При цементации і нітроцементации необхідне нагрівання деталі до температур вище фазових перетворень, і прискорене охолодження, що призводить до значних змін її геометрії, тобто відбуваються значні поводки та жолоблення, після чого необхідно проводити правку деталі під пресом, і якщо виникає небезпека її руйнування, то знову нагрівати, щоб знизити твердість у поверхневому шарі, підвищити пластичність і знову правити на пресі. Іноді цю операцію проводять декілька разів. Якщо деформації не дуже великі, то деталь шліфують в розмір, але при цьому знімають найбільш твердий поверхневий шар. Також усі методи ХТО довготривалі і енергозатратні, а іноді й екологічно небезпечні. Обладнання для забезпечення ХТО складне і великогабаритне [6].

Авторами [7] запропоновано матеріал ЗВ сальникових ущільнень, які серійно вироблялись зі сталі 45, замінити на сталь У8, поверхню якої зміцнюють електромеханічним способом, при цьому її зносостійкість збільшується у 6,1 рази.

Аналіз літературних джерел показує, що на сьогодні більш перспективними методами зміцнення поверхневих шарів деталей є ті, що використовують концентровані потоки енергії (КПЕ): конденсоване іонне бомбардування (метод КІБ) [8], плазмова [9] та лазерна [10] обробка. В результаті дії КПЕ в поверхневому шарі деталі відбуваються нерівноважні процеси нагрівання та охолодження, результатом цього є утворення нових структур, які відрізняються від сформованих традиційними методами обробки.

Серед методів обробки поверхонь деталей, які використовують КПЕ, найбільш перспективним вважається метод електроіскрового легування (ЕІЛ) [11]. Застосування методу ЕІЛ користується широким попитом у спеціалістів підприємств, що займаються зміцненням поверхневих шарів деталей та інженерів дослідників, завдяки характерним особливостям: екологічною безпекою, можливістю проводити процес в локальних місцях і не захищати інші поверхні деталі, відсутністю зміни геометричних розмірів деталі (поводок та короблень), можливістю не тільки наносити на поверхню деталі любых струмопровідних матеріалів, а і насичувати поверхневий шар елементами (вуглецю, бору, сірки тощо) не змінюючи розмір деталі. Так, насичення поверхневого шару вуглецем, шляхом використання при ЕІЛ графітового електрода-інструмента (ЕІ), є процесом альтернативним цементації при ХТО. При використанні ЕІ з графіту температура в локальному місці на поверхні деталі може досягати $10000\text{ }^{\circ}\text{C}$, що активізує процес дифузії вуглецю в поверхню деталі. При високих енергіях розряду, W_p глибина цементованого методом ЕІЛ шару (ЦЕІЛ), наприклад в сталі 40Х може досягати більше 1,0 мм. Зі збільшенням W_p і зменшенням продуктивності цементації, Q відбувається збільшення глибини зміцненого шару і шорсткості поверхні, наприклад, при ЦЕІЛ сталі 40Х з $Q = 0,2\text{ см}^2/\text{хв}$ і $W_p = 6,8\text{ Дж}$ шорсткість її поверхні збільшується з $Ra = 0,5$ до 14,0 мкм, а товщина зміцненого шару досягає 1,15 мм [12]. Слід відмітити, що при ЦЕІЛ суцільність обробки поверхневого шару деталі має практично 100%, а твердість на поверхні цементованого шару знаходиться в межах 1100-900 НV.

Таким чином, для зміцнення поверхневих шарів ЗВ одним з найбільш перспективних сучасних методів, які базуються на використанні КПЕ є ЕІЛ.

Як уже згадувалось вище, недоліком ЦЕІЛ є збільшення шорсткості поверхневого шару, а також зниження втомної міцності. Ці недоліки усуваються за рахунок комбінації ЕІЛ з іншими методами покращення якості поверхні, які використовують, як при виготовленні, так і при відновленні деталей. Цими методами є нанесення полімерних матеріалів (ПМ) [13] і поверхневе пластичне деформування (ППД) [14]. Їх наносять після ЕІЛ.

При нанесенні ПМ заповнює всі западини, шорсткості, яка сформувалась при ЦЕІЛ і його поверхневий шар може бути вище або нижче виступів шорсткості. З метою досягнення найменшої шорсткості поверхні композиційного покриття, яке складається з ПМ і шорсткості цементованого матеріалу сталі, його частково видаляють (рис. 2).

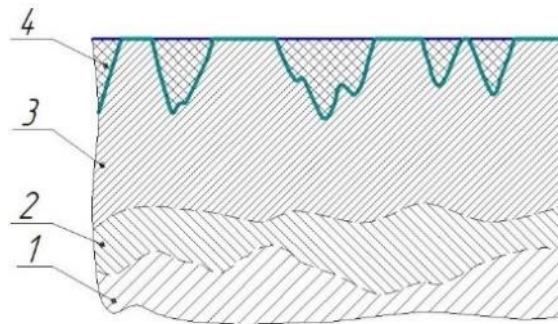


Рис. 2. – Схематичне зображення композиційного покриття, сформованого в послідовності: ЦЕІЛ+ПМ з частково видаленим шаром поверхні. 1 – основа; 2 – перехідний шар; 3 – шорсткість цементованої поверхні; 4 – покриття ПМ

Поверхневий шар можна видалити шліфуванням, але при цьому абразивні частки з шліфувального кола впроваджуються в м'який ПМ, що небажано при подальшому використанні такого покриття для ЗВ. Краще зрізати поверхню металорізальним інструментом (МІ). Враховуючи, що композиційний поверхневий шар складається з м'якого ПМ і твердого матеріалу шорсткості поверхні після ЦЕІЛ, МІ буде «працювати» на удар і його краще використовувати не з твердого сплаву, ріжуча кромка якого при ударі може сколотись, а з швидкорізальної сталі, наприклад Р6М5, на ріжучу кромку якого нанесене зносостійке покриття [15].

Зрізати поверхневий шар, з нанесеним ПМ, краще на глибину половини шорсткості, Ra , яка сформувалась на поверхні при ЦЕІЛ, тоді площа ділянок з ПМ буде приблизно дорівнювати площі, що складається з залишків виступів шорсткості. Якщо збільшувати глибину обробки, то буде збільшуватись площа, що складається з ділянок зрізаної шорсткості, а площа з ділянок ПМ, відповідно буде зменшуватись і навпаки. Низьку твердість ПМ можна збільшити шляхом додавання в нього, ще на стадії виготовлення, порошку з твердих, зносостійких металів, карбідів і нітридів, наприклад: порошку нікелю, карбиду вольфраму, нітриду цирконію [16]. Такий ПМ називають металополімерним матеріалом (МПМ). Виготовлений МПМ у вигляді консистентної речовини, ретельно втирають в сформовану методом ЦЕІЛ поверхню.

З метою підвищення втомної міцності виробу покриття з композиційного матеріалу, обробляють ППД. В останні роки серед методів ППД найбільш використовують метод БУФО – безабразивної ультразвукової фінішної обробки [11].

Враховуючи вище сказане, нами для захисту ЗВ сальникових ущільнень від зносу, пропонується на їх поверхню наносити комбіноване композиційне покриття (ККП) в послідовності: ЦЕІЛ + МПМ + обробка МІ + БУФО.

Метою роботи є підвищення ефективності вузла СУ відцентрового насосу, працюючого в важких умовах корозійного і абразивного впливу, притаманному меліоративним системам, шляхом нанесення на поверхню захисної втулки ККП, за рахунок послідовного використання екологічно безпечних методів: ЦЕІЛ + нанесення МПМ + обробка МІ + БУФО.

Задачі дослідження:

- оцінити вплив різних матеріалів деталі (захисної втулки) на знос;
- визначити вплив ККП на величину зносу поверхні ЗВ.

Науковою новизною є те, що вперше визначено глибину обробка МІ, сформованого композиційного покриття, сформованого в послідовності: ЦЕІЛ + МПМ, при якій забезпечується співвідношення однакової площини МПМ і цементованої поверхні ЗВ.

Методика дослідження. Для визначення впливу матеріалу ЗВ, які працюють в умовах різних оточуючих середовищ, були вибрані сталі різних марок: 40Х, 30Х3 і 12Х18Н10Т, з яких виготовляли зразки, розміром 15х15х15 мм. Режими термічної обробки і фізико-механічні властивості матеріалу зразків представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 - Режими термічної обробки і механічні властивості матеріалу зразків для іспитів на зносостійкість

Матеріал зразків	Вид термічної обробки	Межа		Твердість, HV, HRC	Основні позитивні властивості
		міцності, HV	плинності, HV		
Сталь 40Х	Гартування 860 °С; відпал	53	27,5	325 HV	Висока механічна міцність, низька чутливість до корозії.
Сталь 30Х13	Гартування 1050 ⁰ С; відпал	73,5	58,8	44,0 HRC	Висока зносо- і корозійна стійкість до низько агресивних середовищ.
Сталь 12Х18Н10Т	Гартування 1080 ⁰ С, відпал	54	24	165 HV	Корозійно-стійка проти органічних кислот.

На поверхню зразків, для проведення порівняльних іспитів на знос, наносили ККП, варіанти яких зведені в таблиці 2.

МПМ складався з двокомпонентної епоксидної системи, наповненої феросиліконом марки Loctite 3478 в яку додавали порошки нікелю марки ПНЕ (ГОСТ 972297), карбіду вольфраму, виготовленому згідно ТУ 48-4205-112-2017, нітриду цирконію, зробленому згідно специфікації CAS 25658-42-8, з концентрацією, відповідно 60; 60 і 80%.

Після завершення полімеризації (затвердіння) поверхневий шар проточували МІ на глибину, яка дорівнювала половині шорсткості, Ra, сформованій на поверхні зразків після ЦЕІЛ. ЦЕІЛ проводили при $W_p=6,8$ Дж і продуктивності обробки $Q = 2,0$ см²/хв.

Таблиця 2 – Покриття для порівняльних випробувань зразків

Матеріал зразка	Склад покриття
Сталь 40Х	Без покриття
	ЦЕІЛ + МПМ, армований порошком Ni + обробка МІ + БУФО
	ЦЕІЛ+МПМ, армований порошком WC + обробка МІ + БУФО
	ЦЕІЛ+МПМ, армований порошком NZr + обробка МІ + БУФО
Сталь 30Х13	Без покриття
	ЦЕІЛ + МПМ, армований порошком Ni + обробка МІ + БУФО
	ЦЕІЛ+МПМ, армований порошком WC + обробка МІ + БУФО
	ЦЕІЛ+МПМ, армований порошком NZr + обробка МІ + БУФО
Сталь 12Х18Н10Т	Без покриття
	ЦЕІЛ + МПМ, армований порошком Ni + обробка МІ + БУФО
	ЦЕІЛ+МПМ, армований порошком WC + обробка МІ + БУФО
	ЦЕІЛ+МПМ, армований порошком NZr + обробка МІ + БУФО

Для порівняльних випробувань зразків з покриттями і без покриттів використовували установку, конструктивні особливості якої детально описані в [16]. Установка, яка складалась з баку, заповненому водною

сумішшю піску з частинками розміром до 0,5 мм і концентрацією 50 г/л, розташовувалась на столі свердильного верстату (рис. 3, а). Крім піску в бак додавали оцет, доводячи концентрацію до 5%.



Рис. 3 – Установка для іспитів (а); ротор (б); утримувач зразків (в)

В бак розташовувався ротор (рис. 3, б), верхня частина якого знаходилась в патроні верстату, з шпинделем якого він обертався, а нижня призначалась для перемішування суміші. Крім цього на роторі закріплювався диск з розташованими на ньому утримувачами зразків (рис. 3, в).

Зразки розташовувались під кутом 45° і обертались при $v = 120$ об/хв. Лінійний знос визначався на протязі 24 годин, шляхом виміру величини шорсткості (R_a) поверхні зразка, яку вимірювали профілографом - профілометром через кожні 6 годин випробувань.

Під час проведення порівняльних іспитів зразки були розділені на дві серії по шість зразків в кожній:

1) Зразки сталей марок: 40X, 30X3 і 12X18H10T без покриття і з покриттям: ЦЕЛІ + МПМ, армованим порошком нікелю + обробка МІ + БУФО.

2) Зразки сталей марок: 40X, 30X3 і 12X18H10T з покриттям:

- ЦЕЛІ + МПМ, армованим порошком WC + обробка МІ + БУФО;

- ЦЕЛІ + МПМ, армованим порошком NZr + обробка МІ + БУФО.

Результати досліджень. Перед началом іспитів шорсткість зразків без покриття, після шліфувки, складала $R_a = 0,12-0,15$ мкм, а після ЦЕЛІ → нанесення МПМ → обробка МІ+ БУФО, знаходилась в межах 0,5 - 0,6 мкм.

Результати, проведених іспитів, на зносостійкість зведені в таблицю 3 і представлені на рисунках 4 і 5.

Таблиця 3 – Результати досліджень зношування сталевих зразків з матеріалу: 40X, 30X3 і 12X18H10T в умовах корозійного і абразивного впливу

№ зразка	Покриття	Шорсткість, R_a , мкм			
		6 год	12 год	18 год	24 год
Перша серія					
1	Сталь 40X без покриття	1,6	3,4	4,3	6,2
2	Сталь 30X13 без покриття	1,1	2,3	3,5	4,7
3	Сталь 12X18H10T без покриття	1,2	2,4	3,6	4,8
4	Сталь 40X + ЦЕЛІ+ МПМ* + обробка МІ + БУФО	0,8	1,7	2,6	3,6
5	Сталь 30X13 + ЦЕЛІ+ МПМ* + обробка МІ + БУФО	0,8	1,5	2,3	3,1
6	Сталь 12X18H10T+ ЦЕЛІ+ МПМ* + обробка МІ + БУФО	0,8	1,6	2,4	3,3
Друга серія					
1	Сталь 40X + ЦЕЛІ+ МПМ** + обробка МІ + БУФО	0,5	1,1	1,9	2,9
2	Сталь 30X13 + ЦЕЛІ+ МПМ** + обробка МІ + БУФО	0,5	0,9	1,5	2,3
3	Сталь 12X18H10T+ ЦЕЛІ+ МПМ** обробка МІ + БУФО	0,5	1,0	1,7	2,5
4	Сталь 40X + ЦЕЛІ+ МПМ*** + обробка МІ + БУФО	0,5	1,0	1,8	2,8
5	Сталь 30X13 + ЦЕЛІ+ МПМ*** + обробка МІ + БУФО	0,5	0,8	1,4	2,2
6	Сталь 12X18H10T+ ЦЕЛІ+ МПМ*** + обробка МІ + БУФО	0,5	0,9	1,6	2,4

*-армування порошком Ni; **- армування порошком WC; ***-армування порошком NZr.

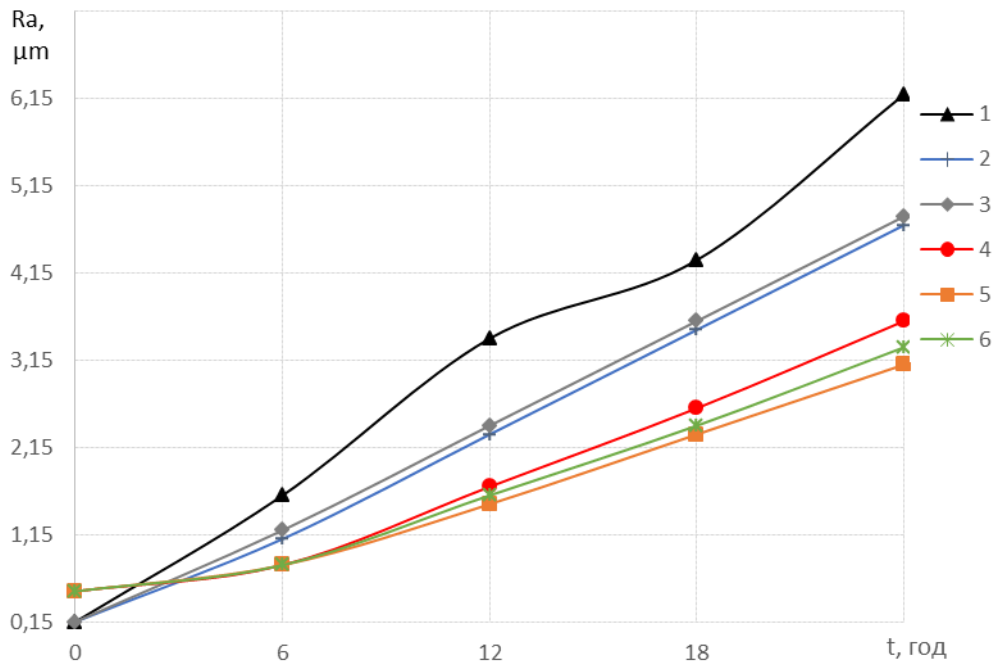


Рис. 4. – Результати зношування зразків в умовах корозійного і абразивного впливу: 1; 2 і 3 – відповідно сталь 40Х, 12Х18Н10Т і 30Х13 без покриття; 4; 5 і 6 – відповідно сталь 40Х, 12Х18Н10Т і 30Х13 з покриттям: ЦЕЛІ + МПМ, армований порошком Ni + обробка МІ + БУФО

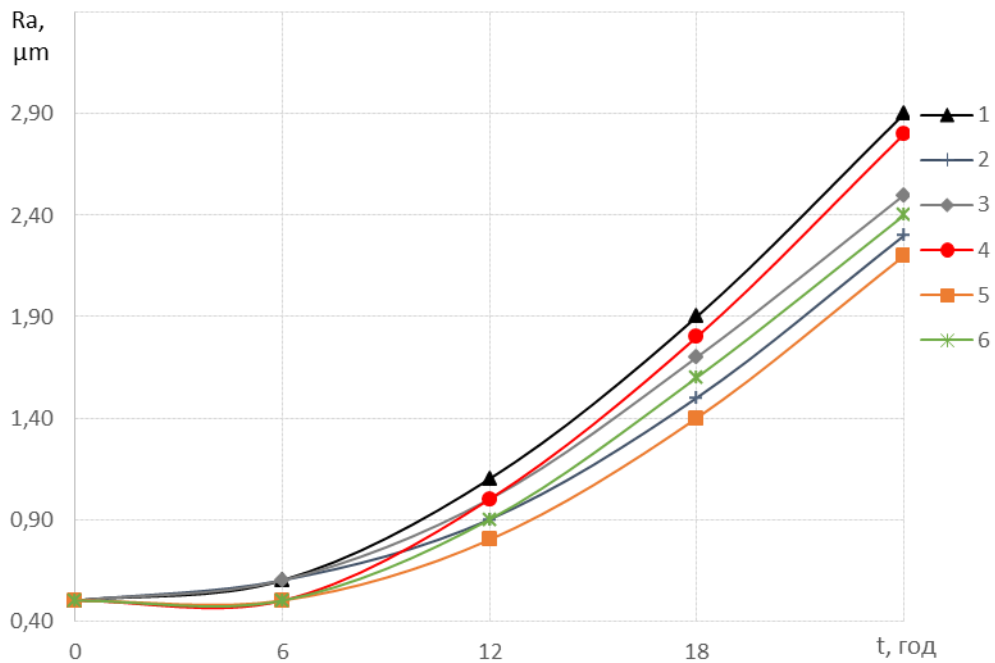


Рис. 5. – Результати зношування зразків в умовах корозійного і абразивного впливу: 1; 2 і 3 – відповідно сталь 40Х, 12Х18Н10Т і 30Х13 з покриттям: ЦЕЛІ + МПМ, армований порошком WC + обробка МІ + БУФО; 4; 5 і 6 – відповідно сталь 40Х, 12Х18Н10Т і 30Х13 з покриттям: ЦЕЛІ + МПМ, армований порошком NZr + обробка МІ + БУФО

Аналіз таблиці 3 і рисунків 4 і 5 показав, що серед зразків без покриття, кращою зносостійкістю проти корозії і абразивного зносу володіють зразки, виготовлені зі сталі 30Х13, шорсткість яких після 24 годин іспитів становить $Ra = 4,7$ мкм, що відповідно на 2,1 і 31,9% краще ніж у зразків зі сталі 12Х18Н10Т і 40Х.

Серед ККП, які використовували для захисту сталевих зразків від зношування в умовах підвищеного корозійного і абразивного впливу, характерного для поверхонь деталей гідравлічних машин, що працюють у меліоративних системах, кращі показники мають покриття, в яких в якості матеріалу для армування ПМ використовували порошок з нітриду цирконію. Так шорсткість поверхневого шару зразків, виконаних зі сталі 30X13 з ККП, в яких для армування ПМ використовували порошок з нітриду цирконію, після 24 годин іспитів, складає $R_a = 2,2$ мкм, що відповідно на 4,5 і 40,1 % краще ніж при використанні порошоків з карбіду вольфраму і нікелю.

Характерною особливістю динаміки зношування в умовах корозії і дії абразивних часток є те, що з часом ефективність процесу зношування зростає, що більш виражається на зразках з покриттями. Це пояснюється тим, що з часом, (по мірі заглиблення) зменшується вплив на процес зношування властивостей ККП (твердості і захисту від корозії), а у зразків без покриттів з часом на поверхні з'являється все більш зруйнованих ділянок і зростання інтенсивності зношування, хоч і значно менш ніж у зразків з покриттями, але також має місце. Характер залежності зношування від часу випробування в першому наближенні нагадує експоненційно зростаючу залежність.

Висновки:

1. Запропонований новий спосіб захисту поверхневих шарів захисних сталевих втулок сальникових ущільнень насосів, працюючих в важких умовах меліоративних систем, від корозійного і абразивного зношування, який полягає в формуванні на їх поверхнях комбінованих композиційних покриттів (ККП), нанесених в послідовності: ЦЕЛ + МПМ + обробка МІ + БУФО, значно збільшує здатність опиратися зношуванню, та гарантує більш надійну роботу в агресивних середовищах.

2. Матеріали досліджуваних зразків по стійкості проти корозійного і абразивного зношування розподіляються в ряд: 30X13, 12X18H10T і 40X. Кращою зносостійкістю володіють зразки, виготовлені зі сталі 30X13, шорсткість яких становить $R_a = 4,7$ мкм, що відповідно на 2,1 і 31,9% краще ніж у зразків зі сталі 12X18H10T і 40X.

3. Металеві порошки, які використовують при армуванні МПМ, по ступеню забезпечення найменшого зносу поверхонь в умовах дії підвищеної корозії і абразиву, розподіляються в послідовності: порошок нітриду цирконію, порошок карбіду вольфраму і нікелю. Шорсткість поверхневого шару зразків, виконаних зі сталі 30X13 з ККП, в яких для армування ПМ використовували порошок з нітриду цирконію, після 24 годин іспитів, складає $R_a = 2,2$ мкм, що відповідно на 4,5 і 40,1 % краще ніж при використанні порошоків з карбіду вольфраму і нікелю.

4. Динаміка зношування сталевих зразків, під дією корозії і абразивних часток, характеризується збільшенням з часом її ефективності, що більш відображається на зразках з покриттями, які поступово втрачають вплив на процес зношування властивостей ККП (твердості і захисту від корозії). У зразків без покриттів, з часом на поверхні збільшується кількість зруйнованих ділянок і інтенсивність зношування, хоч і значно менш ніж у зразків без покриття, але вона також має місце.

5. В першому наближенні графіки зношування зразків зі сталі 30X13, 12X18H10T і 40X, як з покриттями так і без покриттів, нагадують експоненційно зростаючу залежність.

Список літератури

1. Gaft J. A choice of the seal for the shaft of the pump / J. Gaft, M. Marcinkowski // *Proceeding of the Pump Users International Forum*. - Karlsruhe, 2004. - P. 37-44.
2. Підконтрольна експлуатація обладнання насосних станцій : навч. посіб. / В. О. Панченко, В. Ф. Герман, О. В. Івченко, А. В. Свухов, Д. О. Жигилій. - Суми: Сумський державний університет, 2020. - 270 с.
3. Fernandes F. A. P. Wear of plasma nitrided and nitrocarburized AISI 316L austenitic stainless steel / F. A. P. Fernandes, S. C. Heck, R. G. Pereira, A. Lombardi-Neto // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. - 2010. - Vol. 40 (2). - P. 175.
4. Yeh S. H. Effects of Gas Nitriding on the Mechanical and Corrosion Properties of SACM 645 Steel / S. H. Yeh, L. H. Chiu, H. Chang // *Engineering, Scientific Research Publishing*. - 2011. - Vol. 9 (3). - P. 942.
5. Ben Slima S. Ion and Gas Nitriding Applied to Steel Tool for Hot Work X38CrMoV5 Nitriding Type: Impact on the Wear Resistance / S. Ben Slima // *Materials Sciences and Applications*, 2012. - Vol. 9 (3). - P. 640.
6. Тарельник В. Б. Спосіб екологічно безпечного зміцнення деталей з листової сталі методом електроерозійного легування графітовим електродом / В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Б. О. Саржанов // *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. Серія: Технологія захисту довкілля. - Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. - 2019. Вип. 19 (2). - С. 118-126.*
7. Куликівський В. Л. Механічні властивості поверхневого шару захисних втулок після електромеханічного поверхневого загартування. / В. Л. Куликівський, В. О. Орел // *Збірник тез доповідей XXV Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17-19 жовтня 2024 року)*. МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. - 2024. - С. 312-315.
8. Kuzmin V. I. The technique of formation of the axisymmetric heterogeneous flow for thermal spraying of powder materials / V. I. Kuzmin, A. A. Mikhal'chenko, O. Kovalev, E. V. Kartaeв // *J. of Thermal Spray Technology*. - 2012. - Vol. 21, No. 1. - P. 159-168.
9. Morand G. On the adhesion of diamond-like carbon coatings deposited by low-pressure plasma on 316L stainless steel / G. Morand, P. Chevallier, L. Bonilla-Gameros, S. Turgeon, M. Cloutier, M. Da Silva Pires, A. Sarkissian, M. Tatoulian, L. Houssiau, D. Mantovani // *Surface and Interface Analysis*. -2021. - № 53 (7). - P. 658-671.
10. Pliszka I. Corrosion Resistance of WC-Cu Coatings Produced by Electrospark Deposition / I. Pliszka, N. Radek // *Procedia Engineering*. - 2017. - Vol. 192. - P. 707-712.
11. Тарельник В. Б., Цементация електроерозійним легуванням : монографія / В. Б. Тарельник, Б. Антошевський, В. С. Марцинковський, Є. В. Конопляченко, А. В. Білоус - Суми: Університетська книга, 2015. - 220 с.
12. Патент України на винахід № 82948, 23С 8/00. Спосіб цементації сталевих деталей електроерозійним легуванням / В. С.

- Марцинковський, В. Б. Тарельник, А. В. Белоус / Опубл. 25.03.2008, бюл. № 10
13. 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.
 14. Тарельник В. Б. Дослідження залежності якісних параметрів поверхневих шарів від часу легування при електроерозійній цементації сталей / В. Б. Тарельник, А. В. Белоус // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів. – 2008. - №2. – С. 119-124.
 15. Шуляк М. Л. Зміцнення металорізальних інструментів електроіскровим легуванням пучком електродів. / М. Л. Шуляк, В. Б. Тарельник, Є. М. Гецович, О. О. Василенко, А. О. Доценко // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів. – 2024. - №1 (55) - С.111-116.
 16. Пат. UA № 155984 U УКРАЇНА, МПК (2024.01) В23Н 9/00 В23Н 5/00 / В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Н. В. Тарельник, М. О. Мікуліна, О. М. Лавренко, М. М. Майфат, А. О. Доценко, О. Е. Білий (UA); Спосіб захисту сталевих деталей від гідроабразивного зносу. № u 2023 04251 Заяв. Опубл. 24.04.2024, Бюл. № 17.

Bibliography (transliterated):

1. Gaft J. A choice of the seal for the shaft of the pump / J. Gaft, M. Marcinkowski // Proceeding of the Pump Users International Forum. - Karlsruhe, 2004. - P. 37–44.
2. Pidkontrolna ekspluatatsiia obladnannya nasosnykh stantsii : navch. posib. / V. O. Panchenko, V. F. Herman, O. V. Ivchenko, A. V. Yevtukhov, D. O. Zhyhylii. - Sumy: Sumskiy derzhavnyi universytet, 2020. - 270 s.
3. Fernandes F. A. P. Wear of plasma nitrided and nitrocarbured AISI 316L austenitic stainless steel / F. A. P. Fernandes, S. C. Heck, R. G. Pereira, A. Lombardi-Neto // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. - 2010. - Vol. 40 (2). - P. 175.
4. Yeh S. H. Effects of Gas Nitriding on the Mechanical and Corrosion Properties of SACM 645 Steel / S. H. Yeh, L. H. Chiu, H. Chang // Engineering, Scientific Research Publishing, 2011. - Vol. 9 (3). - P. 942.
5. Ben Slima S. Ion and Gas Nitriding Applied to Steel Tool for Hot Work X38CrMoV5 Nitriding Type: Impact on the Wear Resistance / S. Ben Slima // Materials Sciences and Applications, 2012. - Vol. 9 (3). - P. 640.
6. Tarelnyk V. B. Sposib ekolohichno bezpechnoho zmitsnennia detalei z lystovoi stali metodom elektroeroziinoho lehuвання hraftitovym elektrodom / V. B. Tarelnyk, O. P. Haponova, B. O. Sarzhanov // Ekolohichna bezpeka ta zbalansovane resursokorystuvannia. Seriia: Tekhnolohiia zakhystu dovkillia. - Ivano-Frankivsk: IFNTUNH. - 2019. Vyp. 19 (2). - S. 118–126.
7. Kulykivskiy V. L., Orel V. O. Mekhanichni vlastyivosty poverkhnoveho шарu zakhysnykh vtulok pislia elektromekhanichnogo poverkhnoveho zahartuvannia. / V. L. Kulykivskiy, V. O. Orel // Zbirnyk tez dopovidei XKhV Mizhnarodnoi naukovoї konferentsii "Suchasni problemy zemlerobskoi mekhaniky" (17–19 zhovtnia 2024 roku). MON Ukrainy, Natsionalnyi universytet bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Kyiv. - 2024. – S. 312-315.
8. Kuzmin V. I. The technique of formation of the axisymmetric heterogeneous flow for thermal spraying of powder materials / V. I. Kuzmin, A. A. Mikhal'chenko, O. Kovalev, E. V. Kartaeв // J. of Thermal Spray Technology. - 2012. - Vol. 21, No. 1. - P. 159–168.
9. Morand G. On the adhesion of diamond-like carbon coatings deposited by low-pressure plasma on 316L stainless steel / G. Morand, P. Chevallier, L. Bonilla-Gameros, S. Turgeon, M. Cloutier, M. Da Silva Pires, A. Sarkissian, M. Tatoulian, L. Houssiau, D. Mantovani // Surface and Interface Analysis. -2021. - № 53 (7). - P. 658–671.
10. Pliszka I. Corrosion Resistance of WC-Cu Coatings Produced by Electrospark Deposition / I. Pliszka, N. Radek // Procedia Engineering. - 2017. - Vol. 192. - P. 707–712.
11. Tarelnyk V. B., Tsementatsiia elektroeroziinym lehuванняm : monohrafiia / V. B. Tarelnyk, B. Antoshevskiy, V. S. Martsynkovskiy, Ye. V. Konoplianchenko, A. V. Bilous - Sumy: Universytetska knyha, 2015. - 220 s.
12. Patent Ukrainy na vynakhid № 82948, 23S 8/00. Sposib tsementatsii stalevykh detalei elektroeroziinym lehuванняm / V. S. Martsynkovskiy, V. B. Tarelnyk, A. V. Belous / Opubl. 25.03.2008, biul. № 10.
13. Pat. 104664 UA, МПК В23Н 5/00, В23Н 9/00, С23С 28/00 (2014.01) Спосіб відновлення зношених поверхонь металевих деталей / Мartsynkovskiy V. S., Tarelnyk V. B., Pavlov O. H., Ishchenko A. O. ; zaiavl. 14.08.2012 ; opubl. 25.02.2014, Biul. № 4, 2014.
14. Tarelnyk V. B. Doslidzhennia zalezhnosti yakisnykh parametriv poverkhnivykh шарiv vid chasu lehuвання pry elektroeroziinii tsementatsii stali / V. B. Tarelnyk, A. V. Bilous // Visnyk Sumskoho natsionalnogo ahrarnoho universytetu. Seriia: Mekhanizatsiia ta avtomatyzatsiia vyrobnychykh protsesiv. – 2008. - №2. – S. 119-124.
15. Shuliak M. L. Zmitsnennia metalorizalnykh instrumentiv elektroiskrovym lehuванняm puchkom elektrodів. / M. L. Shuliak, V. B. Tarelnyk, Ye. M. Hetsovych, O. O. Vasylenko, A. O. Dotsenko // Visnyk Sumskoho natsionalnogo ahrarnoho universytetu. Seriia: Mekhanizatsiia ta avtomatyzatsiia vyrobnychykh protsesiv. – 2024. - №1 (55) - S.111-116.
16. Pat. UA № 155984 U УКРАЇНА, МПК (2024.01) В23Н 9/00 В23Н 5/00 / V. B. Tarelnyk, O. P. Haponova, N. V. Tarelnyk, M. O. Mikulina, O. M. Lavrenko, M. M. Maifат, A. O. Dotsenko, O. E. Bilyi (UA); Sposib zakhystu stalevykh detalei vid hidroabrazynnogo znosu. № u 2023 04251 Zaiav. Opubl. 24.04.2024, Biul. № 17.

Надійшла (received) 10.11.2025

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Тарельник В'ячеслав Борисович (Tarelnyk Viacheslav) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технічного сервісу та галузевого машинобудування Сумського національного аграрного університету, м.Суми; тел.: +380503072572, e-mail: tarelnyk@ukr.net
ORCID: 0000-0003-2005-5861

Доценко Артем Олексійович (Dotsenko Artem) – аспірант кафедри технічного сервісу та галузевого машинобудування Сумського національного аграрного університету, м.Суми; тел.: +380660463318, e-mail: a.dotsenko.olivija@gmail.com ORCID: 0009-0000-7230-9435

Мотузний Максим Миколайович (Motuznyi Maksym) - аспірант кафедри технічного сервісу та галузевого машинобудування Сумського національного аграрного університету, м.Суми; тел.: +380678966605, e-mail: Motuzny7@gmail.com ORCID 0009-0008-9759-797X