

## ПРОБЛЕМИ І ПЕРСПЕКТИВИ ВИРІШЕННЯ ПИТАНЬ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ ГІДРОАБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ

**Тарельник Наталія В'ячеславівна**

кандидат економічних наук, доцент  
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна  
ORCID: 0000-0002-6304-6925  
natasha-tarelnik@ukr.net

**Гапонова Оксана Петрівна**

доктор технічних наук, професор  
Сумський державний університет, м. Суми, Україна  
ORCID: 0000-0002-4866-0599  
gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua

**Майфат Микола Миколайович**

PhD студент  
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна  
ORCID: 0009-0004-0563-929X  
mayfat\_snau@ukr.net

**Василенко Максим Юрійович**

PhD студент  
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна  
ORCID: 0009-0000-3115-2072  
Vasylenkomaksymnl@gmail.com

**Гейко Тарас Олександрович**

студент  
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна  
ORCID: 0009-0009-7268-5823  
taras.garndga@gmail.com

*В статті зосереджено увагу на великій кількості машин що працюють в різних галузях (газо-нафтовій, гірничодобувній, хімічній, сільськогосподарській, транспортній тощо) промисловості України і інших господарств, які підлягають негативному впливу гідроабразивного зношування (ГЗ). Це гідравлічні машини (ГМ), серед яких найбільш розповсюдженими є насоси і гідродвигуни, а також центрифуги, для очищення стічних вод, сепаратори, арматура тощо. Від негативного впливу ГЗ залежить безпека, продуктивність, мобільність та ефективність бурових установок, конструктивних елементів бурильних колон, застосування гравійних фільтрів для запобігання надходженню піску із пласта в свердловину, виникнення аварійних ситуацій пов'язаних з руйнуванням поверхневих шарів деталей і вузлів. Деталі машин, поверхні яких контактують з потоками рідини і працюють в важких умовах оточуючих середовищ, підлягають зношенню, яке залежить від: виду тертя, механічних і фізико-хімічних властивостей матеріалу, швидкості відносного переміщення контактуючих поверхонь, величиною і характером навантаження, видом і якістю мастил, умовами експлуатації тощо. Розрізняють декілька видів зношування: корозія, ерозія, гідроабразивне зношення, кавітація, біологічне пошкодження.*

*Для захисту поверхонь сталевих і чавунних деталей від зносу, крім зміцнення поверхневих шарів, серед яких особливе місце займає хіміко-термічна обробка, використовують технології нанесення захисних покриттів: напильовання і наплавлення твердими зносостійкими матеріалами, лазерну обробку шлікерних покриттів, гальваніку, які є шкідливими для здоров'я людини і небезпечними для оточуючого середовища. Серед ефективних, енергоощадних і екологічно безпечних технологій нанесення захисних покриттів, особливе місце займає електроіскрове легування (ЕІЛ), яке в комбінації з поверхневим пластичним деформуванням (ППД) і нанесенням металопластичних матеріалів (МПП), армованих порошками твердих зносостійких матеріалів (карбід вольфраму і нітрид цирконію) може забезпечити захист деталей від гідроабразивного і інших видів зносу.*

***Ключові слова:** електроіскрове легування, високоміцний чавун, сталь, деталь, гідроабразивний знос, покриття, поверхнєве пластичне деформування, металополімерний матеріал.*

DOI <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.4.8>

**Вступ.** Серед усіх машин і пристроїв, що працюють в різних галузях (газо-нафтовій, гірничодобувній, хімічній, сільськогосподарській, транспортній тощо) промисловості

України і інших господарств, дуже велика кількість підлягає негативному впливу гідроабразивного зношування (ГЗ). Це, в першу чергу гідравлічні машини (ГМ), серед

яких найбільш розповсюдженими є насоси і гідродвигуни, а також центрифуги, для очищення стічних вод, сепаратори, арматура і таке інше.

Від негативного впливу ГЗ залежить безпека, продуктивність, мобільність та ефективність бурових установок (Mironov Yu. V. et al., 2014), руйнування конструктивних елементів бурильних колон (Lyskanych M. V. et al., 2012), належне застосування гравійних фільтрів для запобігання надходженню піску із пласта в свердловину (Kondrat R. M. & Dremliukh N. S., 2016), виникнення аварійних ситуацій пов'язаних з руйнуванням замкових різьбових з'єднань (Mirnenko V. I. et al., 2017).

Спрацювання деталей вище означеного обладнання, як правило, відбувається в наслідок мікроударного навантаження на їх поверхневі шари. Нерідко мікроударний вплив твердих часок в потоці посилюється присутністю хімічно активної рідини. За таких умов традиційні конструкційні матеріали не завжди задовольняють потрібним вимогам щодо надійності та довговічності.

Останнім часом все більшу увагу фахівців привертає дослідження та використання нових зносостійких матеріалів (полімерних, конструкційних, композиційних) тощо (Lytvynenko O.A. et al., 2010). Роботи направлені на підвищення надійності і довговічності деталей машин, працюючих в умовах гідроабразивного і інших видів зношування актуальні і своєчасні.

**Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій.** Як було показано вище, деталі ГМ, насосів і гідродвигунів, а також центрифуг, сепараторів, арматури тощо працюють в умовах кавітаційно-ерозійного та гідроабразивного зношування, а надійність і довговічність їх роботи визначається можливістю чинити опір спрацюванню. Спрацювання поверхневих шарів деталей в наслідку дії твердих часток, що знаходяться в потокові рідини називають ГЗ, а в результаті зношування поверхні тіла під дією потоку рідини – гідроерозійним.

Як показують статистичні дослідження, у 85–90 % випадків причиною виходу з ладу гідроагрегатів є знос вузлів та деталей; на подолання тертя витрачається близько 30–40 % виробленої енергії (Shymchuk S.P., 2008). В (Mozghovyi O. et al., 2019) стверджується, що основною причиною зниження експлуатаційних характеристик і ресурсу шестеренних насосів є зношування його деталей, а відмови насосів складають 67–75 % (Posviatenko E.K. et al., 2017).

Співробітники лабораторії експлуатації насосних станцій Андижанського інституту сільського господарства та Агротехнології для вирішення проблеми підвищення ККД відцентрових і осьових насосів при перекачуванні води з високим вмістом осаду, запропонували спосіб нанесення полімерного покриття на металеві поверхні лопатей, шляхом нанесення на їх поверхню епоксидної смоли ЕД-6 з різними наповнювачами. Було встановлено, що найкраще зчеплення полімерного покриття досягається при температурі металу 21 °С (Ulugojaev K. Kh., 1989).

Найвищу зносостійкість мають полімерні матеріали на основі епоксидної смоли з карбідом кремнію, при

цьому силумін (матеріал насосу) демонструє низьку зносостійкість. При випробуванні ґрунтових насосів виявилось, що деталі, виготовлені з електрокорунду на епоксидно-фенол-формальдегідній зв'язці в порівнянні з деталями із зносостійкого чавуну збільшує термін служби насосів у 3-8 разів (Leonidov L. D. J., 1987).

Слід відмітити, що використання зносостійких полімерних матеріалів для виготовлення та покриття деталей насосів не знайшло широкого застосування в практиці з таких причин (Mamazhonov M. et al., 2022): 1) полімерні композиції не забезпечують задовільної зносостійкості при високих витратах; 2) шорстка поверхня полімерних покриттів створює додаткові гідравлічні опори і погіршує гідравлічний ККД; 3) якість полімерних покриттів сильно залежить від чіткого дотримання умов застосування технології.

У (Niță A. et al., 2023) автори встановлювали кореляцію між хімічним складом матеріалів лопатей змішувачів що використовуються у виробництві цементного бетону і працюють в особливих умовах, таких як механічні навантаження, явища абразивно-ерозійного тертя, корозійне робоче середовище та їх поведінкою в процесі зношування. Новизна дослідження полягає в експериментальній програмі з використанням найпоширеніших чавунів, що використовуються в промисловості. Автори проводили прискорені випробування в лабораторних умовах з метою дослідження інтенсивності явища зношування змішувальних лопатей в абразивному/ерозійному середовищі. Для промислових застосувань, специфічних для виробництва цементного бетону, рекомендовано використання чавуну з 25 % Cr або 4 % Cr. Вибір проміжного класу (9 % Cr) не є виправданим, оскільки він має вищу ціну та нижчу продуктивність, ніж клас 4 % Cr.

Абразивне зношування створює значні проблеми для промисловості бетономішалок, оскільки відбувається як у сухих, так і вологих умовах. Елементи, що обертаються, зазвичай виготовляються зі сталі, а стійкість до стирання сталі визначає термін служби та масу барабана. У роботі (Jungedal M., 2012) автором розроблено експериментальний стенд для перевірки відносної зносостійкості різних видів сталі в умовах, що імітують бетономішувачі. Випробування використовували подрібнений граніт товщиною 16–25 мм і зосереджувались на зносі від ковзання та ударному зносі для 30 різних типів сталі. Усі марки сталі були проаналізовані щодо профілю твердості, мікроструктури та хімічного складу перед випробуванням. Втрати від зносу досліджували шляхом зважування до, під час і після випробувань. Встановлено залежність між твердістю та зносостійкістю на певному рівні твердості. Вища твердість показує кращу зносостійкість для цього типу застосування. Було виявлено, що форма та деградація абразивів впливають на швидкість зношування.

Таким чином, деталі машин, поверхні яких контактують з потоками рідини і працюють в важких умовах оточуючих середовищ підлягають зношенню, яке залежить від: виду тертя, механічних і фізико-хімічних властивостей матеріалу, швидкості відносного переміщення контактуючих поверхонь, величиною і характером навантаження, видом і якістю мастил, умовами експлуатації тощо. Розрізняють декілька видів зношування: *корозія*,

*ерозія, гідроабразивне зношення, кавітація, біологічне пошкодження.* Для виготовлення деталей, стійких проти гідроабразивного і інших видів зношування в залежності від оточуючого середовища використовують корозійностійкі сталі, високоміцні і хромисті чавуни.

В залежності від особливостей в яких протікає процес тертя розрізняють декілька видів зношування. Це: *корозія, ерозія, кавітація, біологічне пошкодження* (рис. 1) (Нерман V.F., 2014).

В цей час для конструкторів і технологів є велика кількість технологій, призначених для надання поверхневому шару деталі необхідних фізичних, хімічних, трибологічних та експлуатаційних властивостей. Так для захисту поверхонь деталей від різних видів зношування та негативного впливу навколишнього середовища їх піддають зміцненню. Це: різні способи наплення металокерамічних покриттів (Shatskyi I.P. et al., 2020; Storozhenko M.S., 2017; Umanskyi O. et al., 2020), наплення покриття з композиційних матеріалів (Bembenek M. et al., 2022; Trembach B.O. et al., 2022), відцентрове армування поверхневих шарів сталі частинками карбиду вольфраму (Ropyak L., et al., 2016), покриття з шарами оксиду алюмінію (Ivasenko I. et al., 2020; Bembenek M. et al., 2022; Student M.M. et al., 2017). Особливе місце серед технологій, що підвищують показники якості поверхонь деталей, займає хіміко-термічна обробка (ХТО), яка поєднує в собі цементацію, азотування, нітроцементацію та ряд інших методів (F.A. P. Fernandes et al., 2010; Shu-Hung Yeh et al., 2011; S. Ben Slima, 2012).

**Висвітлення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** Слід відмітити, що переважна більшість методів зміцнення і відновлювання поверхневих шарів, які під час роботи піддаються зношуванню відбуваються негативними екологічно небезпечними методами, шкідливими, як для людей, так і для оточуючого середовища. Це різні способи наплення, наварювання, наплення, гальваніка також деякі методи ХТО і термічної обробки. Згідно (Sarzhonov B. O., 2021) термічна і ХТО деталей відносяться до найбільш поширених факторів ризику.

Серед розглянутих методів зміцнення і відновлення деталей великої уваги заслуговує електроіскрове легування (ЕІЛ), яке є екологічно безпечним й останнім часом все частіше використовують, як при виготовленні деталей, так і в ремонтному виробництві (Tarelnyk, V.B. et al., 2017). Метод ЕІЛ має ряд специфічних

особливостей: матеріал анода (легуючого електрода) може утворювати на поверхні катода (деталі) шар покриття, надзвичайно міцно зчеплений з поверхнею. У цьому випадку не тільки відсутня межа поділу між нанесеним матеріалом і металом основи, але й відбувається дифузія елементів анода в катод (Tarelnyk V.B. et al., 2022); легування можна здійснювати у зазначених місцях, не захищаючи при цьому решту поверхні деталі; технологія ЕІЛ металевих поверхонь дуже проста, а необхідна апаратура компактна і транспортабельна.

В (Tarelnyk V.B. et al., 2021) представлені результати порівняльних досліджень впливу зварювальних робіт і методу ЕІЛ на зміни в складі повітря, які показали, що в зоні проведення наплення на сталь 12Х18Н10Т зносостійкого покриття електродом марки ОК61.30  $\varnothing 2,5$  мм з'являється велика кількість вуглекислого газу  $\text{CO}_2$  і утворюються нестабільні іони NO, тобто виникають гази, які є отруйними навіть в малих концентраціях. Слідів озону  $\text{O}_3$  за допомогою мас-спектрометра не виявлено.

При дослідженні хімічного складу газового середовища в зоні проведення робіт при ЕІЛ сталі 12Х18Н10Т електродом-інструментом (ЕІ) з твердого сплаву Т15К6 з енергією розряду 3,4 Дж встановлено, що мас-спектр газового середовища практично ідентичний мас-спектру чистого повітря. Незначні відмінності спостерігаються тільки в кількості водяної пари, що пов'язано, швидше за все, з різною вологістю повітря.

Таким чином, для захисту деталей від інтенсивного зношування бажано використовувати технологію ЕІЛ, яка володіє більшістю переваг існуючих методів, а по багатьом (екологічна безпека, локальність зміцнення, нанесення покриття з любого струмопровідного матеріалу, міцний зв'язок з основою тощо) перевищує їх.

**Метою роботи** є забезпечення захисту деталей машин від гідроабразивного і інших видів зношування, шляхом аналізу існуючого накопиченого опиту в цій галузі і на його підставі розробки ефективної, енергоощадної і екологічно безпечної технології.

**Висвітлення основного матеріалу дослідження.** На сьогодні, в різних галузях виготовляється, відновлюється і зміцнюється дуже велика кількість деталей з чавунів. В порівнянні зі сталями у чавунів нижчі механічні властивості, але суттєво кращі технологічні: зносостійкість, антифрикційність, оброблюваність різанням, тощо. Серед чавунів, особливу нішу займають високоміцні чавуни (ВЧ) з кулястим графітом, які завдяки



**Рис. 1. Корозійне руйнування поверхні робочого колеса турбіни (а), кавітаційне знищення напрямного апарату насоса (б), пліснява на моторі-редукторі очисника фар автомобіля (в) дії молюсків на занурені у воду деталі машин (г) (Нерман V. F., 2014)**

оптимальному поєднанню ливарних, фізико-механічних і експлуатаційних властивостей та економічності їх виробництва, широко застосовуються в сучасному машинобудуванні (DSTU 3925-99, 2000). Завдяки їх механічним характеристикам ( $\sigma_{0,2}=370\text{...}700$  МПа,  $\delta = 2\text{...}7$  %, твердість за шкалою Брінелля 153...360 НВ) ВЧ використовують замість сталі, сірого і ковкого чавунів та деяких кольорових сплавів (Movchan V.P. & Berezhnyi M.M., 2001). З ВЧ на перлітній основі, марок ВЧ 500, ВЧ 600, ВЧ 700, ВЧ 800, ВЧ1000, виготовляють поршневі кільця, гільзи, шестерні, деталі двигунів, насосів, виливниці, прокатні валки, тощо (Ukrainska..., 1985).

Аналіз літературних і патентних джерел показує, що існує велика кількість робіт, направлених на покращення параметрів якості поверхневих шарів деталей з чавунів. При цьому дослідниками використовуються різні технології: плазмове поверхнєве модифікування (Samotugina Yu.S. et al., 2021), нанесення у вигляді шлікера сумішей різного складу з подальшим висушуванням і нагріванням плазмотроном (Shylyna O.P., 2017) фрикційною обробкою (Hurei T.A., 2016), введенням домішок модифікаторів (Skoblo T.S. et al., 2019), підігріванням перед заливанням форми (Sposib..., 2016) тощо.

В (Ivankova O.V. et al., 2020) авторами був проведений аналіз технологій, за допомогою яких можливо відновлювати зношені поверхні сталевих і чавунних деталей. При цьому перевага віддавалась методам, які базуються на технологіях, що базуються на використанні висококонцентрованих джерел енергії: електролітичний метод (Karakurkchi A.V., 2015; Yar-Mukhamedova G.S. et al., 2017), газотермічне напилення (Student M.M. et al., 2017; Gvozdecki V.M., 2018), лазерної обробки (Lyashenko B.A. et al., 2010; Skoblo T.S. et al., 2019; Carcel B. et al., 2011; Guzanova A. et al., 2020) та ЕІЛ. 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 (Tarel'nyk V.B. et al., 2021). При застосуванні методу ЕІЛ, автори (Ivankova O.V. et al., 2020) рекомендують використовувати в якості ЕІ прутки з ніхром Х20Н80.

Крім значних переваг, метод ЕІЛ має і недоліки: обмеження товщини і нерівномірність нанесеного шару, підвищення шорсткості поверхні, зниження утомної міцності (Tarel'nyk V.B. et al., 2021). 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) (Tarel'nyk V.B. et al., 2019) і нанесення металополімерних матеріалів (МПМ) (Tarel'nyk V.B. et al., 2021; Tarel'nyk V.B. et al., 2020).

Для захисту проти гідроабразивного зносу, як чавунних, так і сталевих деталей, 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. Ці матеріали раніше наносили на поверхні деталей шлікерним методом з наступним відпалом у вакуумі (Tarel'nyk V.B. et al., 2023). Покриття складу 90 % ВК6 + 10 % 1М нанесені електродами-інструментами, виготовленими методом порошкової металургії (ПМ), дозволяють формувати поверхневий шар на сталевих поверхнях з мікротвердістю до 14200 МПа (Tarel'nik V.B. et al., 2017; Tarel'nyk V.B. et al., 2019).

Незважаючи на те, що технологія ЕІЛ, з використанням ЕІ з матеріалів складу 1М і 90 % ВК6 + 10%1М, за рахунок кращого щеплення нанесеного матеріалу з основою, значно краща від нанесення їх шлікерним методом, але процедура їх виготовлення методом ПМ дуже складна, енергоємна, довготривала і досить вартісна.

В останні декілька років стали з'являтися статті, в яких з метою удосконалення методу ЕІЛ додаткове легування поверхневого шару корисними елементами відбувається за рахунок спеціальних технологічних насичуючих середовищ (СТНС), які попередньо наносяться на поверхню, що легується, у вигляді паст чи суспензій (Tarel'nyk V. et al. New method for..., 2017; Tarel'nyk V. et al. New sulphiding ..., 2017). На наш погляд, технологію нанесення зносостійких покриттів методом ЕІЛ, з використанням ЕІ складу 1М і 90 % ВК6+10 % 1М, що виготовляють шляхом ПМ, можна удосконалити за рахунок використання СТНС.

Для покращення якості сформованих методом ЕІЛ покриттів (зниження шорсткості і підвищення суцільності) на їх поверхню, ретельно втираючи наносять МПМ, які з метою підвищення мікротвердості можна армувати порошками карбиду вольфраму, нітриду цирконію або їх сумішшю, які характеризуються високою 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 (Koutsokeras L.E. & Abadias G., 2012; Chiou S. Y. & Bing H., 1998; Beniaa H.M. et al., 2003).

Найближчим аналогом запропонованої технології, є спосіб формування покриття на поверхнях сталевих деталей, який виконують наступним чином. Перед нанесенням комбінованого електроіскрового покриття поверхню деталі шліфують до Ra = 0,5 мкм. Потім проводять цементацію шліфованої поверхні деталі методом ЕІЛ (ЦЕІЛ). Після виконують алітування цементованого шару алюмінієвим ЕІ з подальшим нанесенням на нього електроіскрового покриття ЕІ з твердого сплаву Т15К6. Далі поверхню сформованого КЕП піддають ППД методом обкатки кулькою. Після полімеризації МПМ, армованого порошком твердосплавної суміші ВК6, частину шару металополімерного матеріалу видаляють до виступів шорсткості покриття з твердого сплаву Т15К6 (Tarel'nyk V. et al., 2020).

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 ГЗ.

Отже, виникає як науковий, так і практичний інтерес провести порівняльні дослідження зносостійкості покриттів, складу (90 %ВК6+10%1М), сформованих на сталевих і чавунних поверхнях, як електродами-інструментами, виготовленими методом порошкової металургії, так і нанесеними методом ЕІЛ з використанням СТНС. При цьому на поверхневий шар покриттів, нанесених різними способами, з метою зниження шорсткості поверхні і підвищення їх суцільності, потрібно наносити МПМ, армовані порошками WC, ZnN або їх сумішшю. На наш погляд, цей спосіб міг би підвищити здатність поверхневого шару деталей чинити опір зношуванню, гарантував би надійність і довговічність їх роботи в агресивних середовищах, був би екологічно безпечним і скоротив витрати на його здійснення.

#### **Висновки:**

1. Деталі машин, поверхні яких контактують з потоками рідини і працюють в важких умовах оточуючих середовищ, підлягають зношенню, яке залежить від: виду тертя, механічних і фізико-хімічних властивостей матеріалу, швидкості відносного переміщення контактуючих поверхонь, величиною і характером навантаження, видом і якістю мастил, умовами експлуатації тощо. Розрізняють декілька видів зношування: корозія, ерозія, гідроабразивне зношення, кавітація, біологічне пошкодження.

2. Для виготовлення деталей, стійких проти гідроабразивного і інших видів зношування в залежності від оточуючого середовища використовують вуглецеві сталі, нержавіючі корозійностійкі сталі, високоміцні і хромисті чавуни.

3. Для захисту поверхонь деталей від зносу, крім зміцнення поверхневих шарів, серед яких особливе місце займає ХТО, використовують нанесення захисних покриттів: напилювання і наплавлення твердими зносостійкими матеріалами, лазерну обробку шлікерних покриттів, які є шкідливими для здоров'я людини і небезпечними для оточуючого середовища.

4. Серед ефективних, енергоощадних і екологічно безпечних технологій нанесення захисних покриттів, особливе місце займає ЕІЛ, яке в комбінації з ППД і нанесенням МПМ, армованих порошками твердих зносостійких матеріалів (карбід вольфраму і нітрид цирконію) може забезпечити захист деталей від гідроабразивного і інших видів зносу.

5. Альтернативою технології нанесення методом ЕІЛ захисних покриттів електродами-інструментами складу 90 %ВК6+10%1М, виготовленими методом порошкової металургії, може бути більш технологічна і дешевша технологія використання ЕІЛ з застосуванням спеціальних технологічних насичуючих середовищ.

#### **Бібліографічні посилання:**

1. Bembenek M., Makoviichuk M., Shatskyi I., Ropyak L., Pritula I., Gryn L. and Belyakovskiy V. (2022). Optical and Mechanical Properties of Layered Infrared Interference Filters. *Sensors*, 22, No. 21: 8105; <https://doi.org/10.3390/s22218105>
2. Bembenek M., Prysyzhnyuk P., Shihab T., Machnik R., Ivanov O., and Ropyak L. (2022). Microstructure and Wear Characterization of the Fe-Mo-B-C-Based Hardfacing Alloys Deposited by Flux-Cored Arc Welding. *Materials*, 15, No. 14: 5074; <https://doi.org/10.3390/ma15145074>
3. Beniaa H.M., Guemmaza M., Schmerberb G., Mosserb A., Parlebas J.C. (2003). Optical properties of non-stoichiometric sputtered zirconium nitride films. *Applied Science*. Vol. 211. P. 146-155.
4. Carcel B., Sampedro J., Ruescas A., & Toneu X. (2011). Corrosion and wear resistance improvement of magnesium alloys by laser cladding with Al-Si. *Physics Procedia*, 12, 353–363. doi: 10.1016/j.phpro.2011.03.045
5. Chiou S. Y. and Bing H. (1998) Residual stress and strains of highly textured ZrN films examined by x-ray diffraction methods. *J. Phys. D.: Appl. Phys.* – Vol. 31. – P. 349-354.
6. DSTU 3925-99 Chavun z kuliastym hraftom dlia vylyvkv. Marky [Cast iron with nodular graphite. Brands]. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy, 2000. 13 p (in Ukrainian).
7. F.A. P. Fernandes, S.C. Heck, R.G. Pereira, A. Lombardi-Neto, G.E. Totten, L.C. Casteletti. (2010). Wear of plasma nitrided and nitrocarburized AISI 316L austenitic stainless steel. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 40 (2): 175.
8. Guzanova A., Džupon M., Draganovská D., Brezinová J., Viňáš J., Cmorej D., Janoško E. & Maruschak P. (2020). The corrosion and wear resistance of laser and mag weld deposits. *Acta Metallurgica Slovaca*, 26 (2), 37–41. doi: 10.36547/ams.26.2.557.
9. Gvozdecki V. M. (2018). Electric arc restorative and protective coatings from cored wires. *Visnik Nacionalnoi Akademii Nauk Ukraini*, 03, 79–84. doi: 10.15407/visn2018.03.079
10. Herman V. F. (2014). Nadiinist hidromashyn i hidropnyvodiv: konspekt lektsii [Reliability of hydraulic machines and hydraulic drives: lecture notes]. Sumy : Sumskiy derzhavnyi universytet. 84 p. (in Ukrainian).
11. Hurei T.A. (2016). Pidvyshchennia znosostiikosti chavunnykh detalei poverkhnevym zmitsnenniam [Increasing the wear resistance of cast iron parts by surface hardening]. *Vestnyk KhNADU*, vyp. 74. pp. 48–52. (in Ukrainian).
12. Ivankova O. V., Harashchuk O. V., Kutsenko V. I., Shcherbyna V. V., Chyzhevskiy D. V., Babych Ya. V., Tikhonov M. O. (2020). Doslidzhennia metodiv vidnovlennia znoshenykh detalei silskohospodarskoi tekhniki [Research of methods of restoration of worn parts of agricultural machinery]. *Visnyk PDAA*. № 4. pp. 283–292 (in Ukrainian).
13. Ivasenko I., Posuvailo V., Veselivska H. and Vynar V. (2020). Porosity Segmentation and Analysis of Oxide Ceramic Coatings of D16T Alloy," *2020 IEEE 15th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, Zbarazh, Ukraine, , pp. 50-53, doi: <https://doi.org/10.1109/CSIT49958.2020.9321900>
14. Jungedal M. (2012). Mild Impact Wear in a Concrete Mixer, An Evaluation of Wet Abrasive Wear. Master's Dissertation, Royal Institute of Technology Department of Material Science and Engineering, Stockholm, Sweden.
15. Karakurkchi A.V. (2015). Functional properties of multicomponent galvanic alloys of iron with molybdenum and tungsten. *Functional Materials*, 22 (2), 181–187. doi: 10.15407/fm22.02.181

16. Kondrat R.M., Dremlukh N.S. (2016). Doslidzhennia vplyvu rozmiru i pronyknosti sztuchno stvorenoi prysverdlovnyoi zony plasta na produktyvnu kharakterystyku sverdlovyny [Study of the influence of the size and permeability of the artificially created near-well reservoir zone on the productive characteristics of the well] *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*. № 1. pp. 14–19 (in Ukrainian).
17. Koutsokeras L. E. and Abadias G. (2012). Intrinsic stress in Zn thin films: Evaluation of grain boundary contribution from in situ wafer curvature and ex situ x-ray diffraction techniques. *J. Appl. Phys.* Vol. 111. P. 093509.
18. Leonidov L. D. J. (1987). *Erosion of pump metals Flower metals*, 6, 26–28
19. Lyashenko B.A., Solovykh Ye.K., & Mirnenko V.I. (2010). Optymizatsiia tekhnologii nanosenia pokryttiv po kryteriakh mitsnosti ta znosostiikosti [Optimization of coating technology according to the criteria of strength and wear resistance]. Kiyev: IPP NAN Ukrainy (in Ukrainian).
20. Lyskanych M.V., Artym V.I., Hrydzuk Ya.S., Dzhus A.P. (2012). Metodyka vyznachennia dovhovichnosti elementiv burylnoi kolony v umovakh vibratsiinoho navantazhuvannia [Methodology for determining the durability of drill string elements under vibration loading conditions] *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovysch*. № 2. pp. 113–119 (in Ukrainian).
21. Lytvynenko O.A., Nekozi O.I., Kavun V.P. (2010). Kavitatsiina stiikist keramichnykh konstruktivnykh materialiv [Cavitation resistance of ceramic structural materials] *Zbirnyk naukovykh prats VAT "UkrNDIVohnetryviv imeni A. S. Berezhnoho"* № 110. Kharkiv: "Karavela". pp.115–118 (in Ukrainian).
22. Mamazhonov M., Shakirov B., Matyakubov B., Makhmudov A. (2022). Polymer materials used to reduce waterjet wear of pump parts *Journal of Physics: Conference Series* 2176 012048
23. Mirnenko V.I., Tkach M.Ya., Pylypiv L.D. (2017). Pidvyshchennia pratsezdatsnosti zamkovykh rizbovykh ziednan burylnoi kolony impulsnym vakuumnym hazotermotsyklichnym ionno-plazmovym azotuvanniam [Increasing the performance of lock threaded joints of a drill string by pulsed vacuum gas-thermocyclic ion-plasma nitriding] *Naftohazova enerhetyka*. № 2. pp. 13–21 (in Ukrainian).
24. Mironov Yu. V., Danylychuk Yu. V., Lie K. K. (2014). Analiz yemnosti rezervuariv tsyrkuliatsiinykh system burovykh ustanovok [Analysis of the capacity of the reservoirs of circulation systems of drilling rigs] *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovysch*. № 1. pp. 151–160 (in Ukrainian).
25. Movchan V. P., Berezhnyi M. M. *Osnovy metalurhii [Basics of metallurgy]*. Dnipropetrovsk: Porohy. 2001. 336 s. (in Ukrainian).
26. Mozghovyi O., Posviatenko E., Posviatenko N., Russkykh V. (2019). Odna iz prychnyn poshodzhennia shesterennykh hidromashyn [One of the causes of damage to gear hydraulic machines] *Aktualni problemy matematyky, fizyky i tekhnologii: zb. nauk. pr. Vinnytskyi derzhavnyi pedahohichnyi universytet imeni Mykhaila Kotsiubynskoho*. Vinnytsia: TOV "Tvory". Vyp. 16. pp. 135–138 (in Ukrainian).
27. Niță A., Petrescu M.G., Dumitru T., Burlacu A., Tănase M., Laudacescu E., Ramadan I. (2023). Experimental Research on the Wear Behavior of Materials Used in the Manufacture of Components for Cement Concrete Mixers. *Materials*, 16, 2326. <https://doi.org/10.3390/ma16062326>
28. Posviatenko E.K., Kropivnyi V.M., Posviatenko N.I., Russkykh V.V. (2017). Remont shesterennykh nasosiv hidrosistem dorozhnykh mashyn [Repair of gear pumps of hydraulic systems of road vehicles] *Bulletin of Kharkov national automobile and highway university. Collection of Scientific Works*. Kh.: KhNAHU. Issue 38. P. 113–117 (in Ukrainian).
29. Ropyak L., Schuliar I., Bohachenko O. (2016). Influence of technological parameters of centrifugal reinforcement upon quality indicators of parts. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Volume 1, Issue 5. P. 53–62. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.59850>
30. S. Ben Slima. (2012). Ion and Gas Nitriding Applied to Steel Tool for Hot Work X<sub>38</sub>CrMoV<sub>5</sub> Nitriding Type: Impact on the Wear Resistance. *Materials Sciences and Applications, Scientific Research Publishing*, 9 (3): 640.
31. Samotugina Yu.S., Lyashenko B.A. and Bezumova O.O. (2021). Influence of Plasma Modification Technology on Structure Formation Mechanisms and Wear Resistance of High Carbon Steels and Cast Irons. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 43, No. 8: 1105–1119, DOI: 10.15407/mfint.43.08.1105.
32. Sarzhanov B.O. (2021). Rozrobka ekolohichno bezpechnykh metodiv vidnovlennia shnekiv mashyn tekhnolohichnoho tsykladu utylizatsii hnoiu [Development of ecologically safe methods of restoration of machine screws of the technological cycle of manure utilization]. – Dysertatsiia na zdobuttia naukovooho stupenia doktora filosofii. Sumskyi natsionalnyi ahrarynyi universytet, Sumy. 246 p. (in Ukrainian).
33. Shatskyi I.P., Perepichka V.V., and Ropyak L.Ya. (2020). On the Influence of Facing on Strength of Solids with Surface Defects. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 42, No. 1: 69–76, DOI: 10.15407/mfint.42.01.0069.
34. Shu-Hung Yeh, Liu-Ho Chiu, Heng Chang. (2011). Effects of Gas Nitriding on the Mechanical and Corrosion Properties of SACM 645 Steel, *Engineering, Scientific Research Publishing*, 9 (3): 942 DOI: 10.4236/eng.2011.39116.
35. Shylina O.P. (2017). Zmitsnennia stalevykh ta chavunnykh detalei termoreahuiuchymy sumishamy [Strengthening of steel and cast iron parts with thermosetting mixtures] *VMT, Sich*, vyp. 2, pp. 115–119. (in Ukrainian).
36. Shymchuk S.P. (2008). Metod doslidzhennia protyznosnykh vlastyvostei mastylnykh materialiv pry radialnykh kolyvanniakh valu. [A method of researching anti-wear properties of lubricants during radial vibrations of the shaft] *Avtoreferat dysertatsii na zdobuttia naukovooho stupenia kandydata tekhnichnykh nauk*. Kyiv. 16 p. (in Ukrainian).
37. Skoblo T.S., Rybalko N.N., Tykhonov A.V., & Martynenko A.D. (2019). Analiz sposobiv vyhotovleniya, zmitsnennia ta vidnovlennia lap kultyvatora [Analysis of methods of manufacturing, strengthening and restoration of cultivator paws]. *Tekhnichnyy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta Transportnoho Kompleksiv*, 15, 60–85 (In Ukrainian).
38. Skoblo T.S., Sidashenko O.I., Saichuk O.V. (2019). Korpusni detali z chavuniv ta yikh yakisni pokaznyky: Monohrafiia [Casing parts made of cast iron and their quality indicators: Monograph] / Pid red. d.t.n. prof. Skoblo T.S. Kh: Disa plus. 282 p. (in Ukrainian).



39. Sposib vyrobnystva prokatnykh valkiv [Method of production of rolling rolls]: pat. Ukraina № 105761 MPK B22D 23/00, B21B 27/00. u2015 07442. zaiavl. 24.07.2015.; opubl. 11.04.2016., Biul. № 7 (in Ukrainian).
40. Storozhenko M.S. (2017). Effect of Molybdenum Additions on the Structurization of Fe–Mo Alloys and Contact Interaction in the  $TiB_2$ –(Fe–Mo) Systems. *Powder Metall Met Ceram* 55, 617–624. <https://doi.org/10.1007/s11106-017-9847-y>
41. Student M.M., Hvozdet'skyi V.M., Stupnyts'kyi T.R. & Dzioba Y. V. (2017). 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*, 13 (6), 34–38. doi: 10.15407/scine13.06.034
42. Student M.M., Dovhnyuk V.M., Posuvailo V.M., Koval'chuk I.V. and Hvozdet's'kyi V.M. (2017). Friction Behavior of Iron-Carbon Alloys in Couples with Plasma-Electrolytic Oxide-Ceramic Layers Synthesized on D16T Alloy. *Materials Science*, 53, No. 3: 359. <https://doi.org/10.1007/s11003-017-0083-x>
43. 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.* 53, 285–294. <https://doi.org/10.3103/S1068375517030140>
44. Tarel'nik V.B., Paustovskii A.V., Tkachenko Y.G., Martsinkovskii V.S., Konoplyanchenko E.V., Antoshevskii B. (2017). Electric-spark coatings on a steel base and contact surface for optimizing the working characteristics of babbitt friction bearings. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 53 (3), pp. 285–294. <https://doi.org/10.3103/S1068375517030140>
45. Tarelnyk V. B., Gaponova O. P. and Konoplianchenko Ye. V. (2022). Electric-Spark Alloying of Metal Surfaces with Graphite. *Progress in Physics of Metals*, 23, No. 1: 27–58
46. Tarelnyk V. B., Gaponova O. P., Loboda V. B., Konoplyanchenko E. V., Martsinkovskii V. S., Semirnenko Yu. I., Tarelnyk N. V., Mikulina M. A. and Sarzhanov B. A. (2021). Improving Ecological Safety when Forming Wear-Resistant Coatings on the Surfaces of Rotation Body Parts of 12Kh18N10T Steel Using a Combined Technology Based on Electrospark Alloying. *Surf. Eng. Applied Electrochemistry*, 57: 173.
47. Tarelnyk V. B., Gaponova O. P., Melnyk V. I., Tarelnyk 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. (2023) 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. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* vol. 45, pp. 683-706
48. Tarelnyk 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, p. 265–277. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.864.265>
49. Tarelnyk V., Martsynkovskyy V., Gaponova O., Konoplianchenko I., Belous A., Gerasimenko V., Zakharov M. (2017). New method for strengthening surfaces of heat treated steel parts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 233 (1), art. no. 012048. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/233/1/012048>
50. Tarelnyk V., Martsynkovskyy V., Gaponova O., Konoplianchenko I., Dovzyk M., Tarelnyk N., Gorovoy S. (2017). New sulphiding method for steel and cast iron parts *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 233 (1), art. no. 012049. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/233/1/012049>
51. Tarelnyk V.B., Gaponova O.P., Konoplianchenko Ye.V., Martsynkovskyy V.S., Tarelnyk N.V. and Vasylenko O.O. (2019). 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, <https://doi.org/10.15407/mfint.41.03.0313>
52. Tarelnyk V.B., Gaponova O.P., Konoplianchenko Ye.V., Martsynkovskyy V.S., Tarelnyk N.V., Vasylenko O.O. (2019). Improvement of quality of the surface electroerosive alloyed layers by the combined coatings and the surface plastic deformation. I. Features of formation of the combined electroerosive coatings on special steels and alloys, *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 41 (1), pp. 47-69. <https://doi.org/10.15407/mfint.41.01.0047>
53. 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. (2021). Improving Ecological Safety when Forming Wear-Resistant Coatings on the Surfaces of Rotation Body Parts of 12Kh18N10T Steel Using a Combined Technology Based on Electrospark Alloying. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 57: 173. <https://doi.org/10.3103/S1068375521020113>
54. Tarelnyk 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*, 58 (11-12), pp. 703–713.
55. Trembach B.O., Sukov M.G., Vynar V.A., Trembach I.O., Subbotina V.V., Rebrov O.Yu., Rebrova O.M. and Zakiev V.I. (2022). Effect of Incomplete Replacement of Cr for Cu in the Deposited Alloy of Fe–C–Cr–B–Ti Alloying System with a Medium Boron Content (0.5 % wt.) on its Corrosion Resistance. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 44, No. 4: 493; <https://doi.org/10.15407/mfint.44.04.0493>
56. Ukrainska radianska entsyklopediia [Ukrainian Soviet encyclopedia] : u 12 t. / hol. red. M. P. Bazhan ; redkol.: O. K. Antonov ta in. – 2-he vyd. – K. : Holovna redaktsiia URE, 1974–1985. (in Ukrainian).
57. Ulugojaev K. Kh. (1989). Removal of axial pumps, Tashkent: Mehnat
58. Umanskiy O., Storozhenko M., Baglyuk G., Melnyk O., Brazhevsky V., Chernyshov O., Terentiev O., Gubin Yu., Kostenko O., Martsenyuk I. (2020). Structure and Wear Resistance of Plasma-Sprayed NiCrBSiC–TiCrC Composite Powder Coatings. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 59, № 7-8: 434–444. <https://doi.org/10.1007/s11106-020-00177-y>
59. 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

**Tarelnyk N. V.**, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine  
**Gaponova O. P.**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Sumy State University, Sumy, Ukraine  
**Maifat M. M.**, PhD student, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine  
**Vasylenko M. Yu.**, PhD student, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine  
**Heiko T. O.**, Student, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

**Problems and prospects for solving the issues of increasing the durability of machine parts operating under conditions of hydroabrasive wear**

The article focuses on a large number of machines operating in various branches (gas-oil, mining, chemical, agricultural, transport ones, etc.) of industry and other fields in Ukraine that are subject to the negative impact of hydro abrasive wear (HW). These are hydraulic machines (HM), among which the most common are pumps and hydraulic engines, as well as centrifuges for wastewater treatment, separators, fitting, etc. The safety, productivity, mobility and efficiency of drilling rigs, structural elements of drill strings, the use of gravel filters to prevent the inflow of sand from the bed into the well, and the occurrence of emergencies associated with the destruction of the surface layers of the component parts and assemblies depend on the HW negative impact. The machine parts, the surfaces of which are in contact with fluid flows and operate in harsh environmental conditions, are subject to wear. The wear depends on the type of friction, mechanical and physicochemical properties of the material, the speed of relative movement of the contacting surfaces, the magnitude and nature of the load, the type and quality of lubricating oils, operating conditions, etc. There are several types of wear: corrosion, erosion, hydro abrasive wear, cavitation, biological damage.

To protect the surfaces of steel and cast iron parts from wear, in addition to strengthening the surface layers, among which the thermochemical treatment (TCT) occupies a special place, there are used protective coating technologies. Those are such ones as depositing and surfacing with hard wear resistant materials, laser processing of slip coatings, and electroplating, which are harmful to human health and hazardous to the environment. Among the effective, energy-saving, and environmentally friendly technologies for applying protective coatings, the electric spark alloying (ESA) process occupies a special place. As combined with surface plastic deformation (SPD) and application of metal-plastic materials (MPM) reinforced with powders of hard wear resistant materials (tungsten carbide and zirconium nitride), the ESA process can provide protection of parts from hydro abrasive and other types of wear.

**Key words:** electric spark alloying, high-strength cast iron, steel, part, hydro abrasive wear, coating, surface plastic deformation, metal-polymer material.