

ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ, ЗАДІЯНИХ В СИСТЕМАХ ЗРОШЕННЯ КОМБІНОВАНИМИ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИМИ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ МЕТОДАМИ

Тарельник В'ячеслав Борисович

доктор технічних наук, професор
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0003-2005-5861
tarelnik@i.ua

Пирогов Віктор Олександрович

аспірант
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0002-6335-1276
viktor80ua@gmail.com

В статті проведений аналіз сучасному стану меліоративного землеробства.

З метою підвищення надійності і довговічності насосних агрегатів (НА), задіяних в системах зрошення, удосконалена технологія виготовлення і ремонту поверхневих шарів шийок валів роторів відцентрових насосів (ВН) під підшипники ковзання (ПК), та посадкові поверхні деталей що збираються з натягом, шляхом використання екологічно та техногенно безпечних технологій електроіскрового легування (ЕІЛ), поверхневого пластичного деформування (ППД) і нанесення метало-пластичних матеріалів (МПМ). При цьому: а) розроблений і апробований новий спосіб цементації їх поверхонь методом ЕІЛ при якому покращуються параметри якості поверхневого шару; б) розроблений і апробований новий спосіб формування методом ЕІЛ сульфомолібденових покриттів, в поверхневому шарі яких знаходиться до 5% дисульфиду молібдену. Розроблений новий спосіб формування методом ЕІЛ на посадкових шийках валів роторів ВН зносостійких покриттів складу Al-C-B, при якому з підвищенням енергії розряду (W_p) збільшується мікротвердість як «білого» шару, так і дифузійної зони: при $W_p = 0,13$ Дж – $H_m = 6487$ МПа, а при $W_p = 4,9$ Дж – 12350 МПа. Для удосконалення технології відновлення поверхневого шару валу запропонований новий спосіб, що включає операцію цементації методом ЕІЛ, яка супроводжується подачею в зону легування азоту, що є процесом нітроцементації при якому підвищується мікротвердість з 10500 до 10600 МПа і глибина зони підвищеної твердості з 120 до 150 мкм, а такожі зменшується шорсткість поверхні R_a , з $0,7$ до $0,6$ мкм.

Запропоновано фізично обґрунтовану математичну модель процесу зносу (рівняння зносу), що дозволяє по роботі тертя визначати лінійний та ваговий знос поверхні бабітового покриття, сформованого будь яким методом, а також вирішувати зворотню задачу - дозволяє знайти величину роботи тертя, необхідну для здійснення зносу певної кількості речовини або необхідного лінійного зносу. Для різних матеріалів пар тертя (бабітовий вкладиш – шийка ПК) розроблено методичку визначення констант рівняння зносу: найбільшого вагового та лінійного зносу, а також енергію активації процесу зношування, які можуть бути критеріями вибору найбільш раціональної технології підвищення довговічності ПК. Для покращення технології обслуговування і ремонту обладнання, що використовують в системах зрошення, розроблена нова технологія відновлення бабітових покриттів, яка може бути використана для упорних та опорних ПК. Удосконалена технологія захисту деталей їх пружних муфт від фреттинг-корозії. При цьому для зменшення до 50% зносу поверхонь гнучких елементів за новим способом застосовують металомасильні матеріали у вигляді парафіну з добавками з міді, дисульфиду молібдену і графіту; для захисту кріпильних деталей муфт, запропонований новий спосіб, епіламування, що дозволяє знизити коефіцієнт тертя в 2–3 рази. Розроблені і впроваджені у виробництво технологічні рекомендації виготовлення й ремонту деталей НА економічними, енергоощадними і екологічно й техногенно безпечними технологіями, захищеними 10 патентами України із загальним економічним ефектом 856 тис. грн.

Ключові слова: зрошувальне землеробство, насосний агрегат, відцентровий насос, підшипник, пружна муфта, шийки валів, зношування, відновлення, реновація, модернізація.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.2.10>

Вступ. Стабілізація економіки кожної окремо взятої країни та її подальший розвиток у значною мірою визначається успішним розвитком сільськогосподарського виробництва, а збільшення виробництва продукції можливе лише за широкої комплексної механізації та автоматизації трудомістких процесів, у тому числі в зрошувальному землеробстві (Bolotskykh et al., 1988; Bilonozhko et al., 1990; Voitiuk et al., 2004).

Визначальними факторами отримання високорентабельної продукції з низькою собівартістю на сучасному

етапі розвитку землеробства мають стати ресурсозберігаючі технології та технічні засоби зрошення, що забезпечують рослини оптимальною кількістю води та елементами живлення, а також спрямованими діями на збереження екологічної обстановки в агроландшафтах.

За оцінками ООН, агроресурсний потенціал України дозволяє прогодувати 450–500 млн. осіб. Проте сьогодні його можливості використовують лише на третину. Щорічно для потреби водопостачання населення і галузей економіки забирається близько 11 куб. км води,

у тому числі близько 2 куб. км – для сільського господарства (Kovalskyi, 2019). Постійного зрошення потребують майже 19 млн. га орних земель, а водорегулювання – 4,8 млн. га. До всього цього, ми маємо застарілу систему поливу, отриману у спадок від радянського минулого. За оцінками експертів, потреба в інвестиціях на розвиток гідротехнічних меліоративних систем складає близько \$1,5–2 млрд. (Triahobchuk, 2006).

В документі 688-2019-р, від 14.08.2019 «Про схвалення Стратегії зрошення та дренажу в Україні на період до 2030 року» велика увага приділяється модернізації внутрішньогосподарських зрошувальних систем. Модернізація і відновлення працездатності пошкоджених зрошувальних систем, що не втратили свій ресурс включає в себе: заміну обладнання насосних станцій та влаштування вузлів обліку води на насосних станціях підкачки; влаштування протифільтраційних облицювань та регулюючих споруд на відкритій мережі внутрішньогосподарських та міжгосподарських каналах нижчого рівня; у разі необхідності будівництво акумулюючих ємностей.

Таким чином, означені вище заходи передбачають всі наявні в південному регіоні України зрошувальні системи розглядати як такі, що підлягають модернізації, проблеми, що виникають в зв'язку з цим потребують своєчасного вирішення, а роботи в цьому напрямку є актуальними.

Постановка проблеми. Аналіз останніх досліджень та публікацій. У зрошуваному землеробстві знаходять застосування всі основні способи поливу, такі як поверхневий полив, дощування, краплинне та внутрішньоґрунтове зрошення (Dmitriev et al., 1999; Zajdel'man, 2003; Harkavyi et al., 2007; Kuzmenko et al., 2019).

Аналіз обладнання, задіяного в різних способах введення води в ґрунт, показав, що найбільш важливими і відповідальними для забезпечення якісного зрошування є насосні агрегати (НА) (Kuzmenko et al., 2019; Sad-Gorod, 2021), складовими частинами яких є електродвигуни, муфти, насоси.

Серед великої кількості насосів, що використовують переважно при зрошуванні слід відмітити відцентрові насоси (ВН), що створюють високий тиск за рахунок відцентрової сили і володіють високими експлуатаційними властивостями і довговічністю. Вони можуть перекачувати воду як з річки, так і з ємності. До найбільш відомих виробників насосів відносять

наступні фірми: Honda; Aquario; Subaru; Elpumps; AL-KO (Senchenko).

Серед вітчизняних виробників слід відмітити приватне акціонерне товариство «Епос» (ПрАТ «ЕПОС»), яке розташоване у м. Біла Церква і працює вже на протязі 30 років. Воно спеціалізується на виготовленні насосних станцій (НС) для зрошення, потужність і продуктивність яких лежить, відповідно, в межах від 10кВт до 1МВт та вище і від 50 м³/год до 3000 м³/год і вище (рис. 1) (PrAT "Eros").

Постачанням насосного обладнання для реконструкції та модернізації існуючих НС на протязі десятків років займається АТ «СМНПО – Інжиніринг» (колишнє СМНПО ім. М.В. Фрунзе) м. Суми. В 2021 році спеціалістами підприємства підготовлена поставка обладнання (рис. 2) для реконструкції та модернізації існуючих НС системи зрошення ГНС-1 та ГНС-2 в Республіці Таджикистан.

Обладнання, що постачають (табл. 1) представляє собою агрегат електронасосний відцентровий вертикальний, одноступінчастий, спірального типу, з одностороннім робочим колесом. Він призначений для перекачування води та інших рідин, аналогічних за в'язкістю та хімічною активністю, із вмістом завислих частинок не більше 3 г/л, розміром не більше 0,1 мм, з них абразивних частинок не більше 2%, з температурою не більше 45 °С.

Основні переваги агрегату ЦВН 22600-95: найменша маса порівняно з аналогами; потужність у номінальному режимі роботи 6 800 кВт (економія на електроенергії в порівнянні з аналогами складе близько 16 800 кВт на добу); середнє напручування на відмову – не менше 20 000 годин; середній ресурс між капітальними ремонтами – щонайменше 28 000 годин; приєднувальні розміри повністю збігаються із встановленими раніше насосами.

Слід відмітити що «вузьким» місцем підвищення ресурсу НС є привід відцентрового насосу. Як привід використовують, в основному, асинхронні двигуни (АД) і вони виходять з ладу або через руйнування підшипників, або пошкодження обмоток.

Надійність підшипникових вузлів залежить від форми та якості поверхневого шару деталей, від наявності мастильного матеріалу, утворення процесу мастила, відведення продуктів зносу та тепла, але насамперед від забезпечення герметичності підшипникового вузла загалом (Chermenskij et al., 2003).



а



б

Рис. 1. Насосні станції підприємства ПрАТ «ЕПОС»: а – НС для поливу полів (зрошення великих площ); б – плаваюча НС для подачі води (PrAT "Eros")

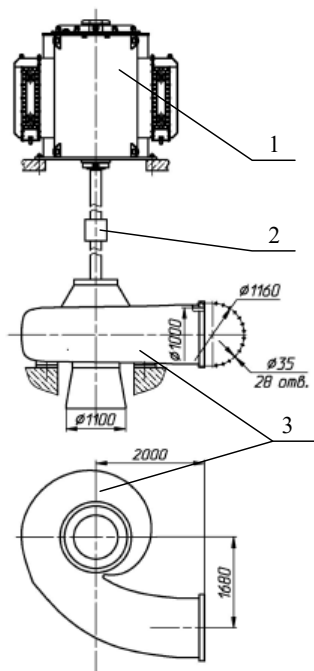


Рис. 2. Обладнання підготовлене АТ «СМНПО – Інжиніринг» для реконструкції та модернізації існуючих НС в Республіці Таджикистан: а – конструктивна схема електронасосного агрегату ЦВН 22600-9; б – типовий загальний вигляд насоса ЦВН 22600-95 (без електроприводу)

Таблиця 1

Технічна характеристика

Подача, м ³ /год	Натиск, м	ККД насоса, %	Споживана потужність, не більше, кВт	Частота обертання, об/хв	Маса, кг, не більше
22 680	95	80	6 800	1 000	25000

Одним із можливих шляхів вирішення даної проблеми є застосування нового типу ущільнень - магніторідинного герметизатора (МРГ), основною перевагою якого є можливість забезпечення практично повної 100% герметизації (Hasselfeld, 2017; Radionov et al., 2004).

Проблема підвищення ефективності та надійності насосного обладнання зрошувальних систем завжди була досить актуальним завданням. Останніми роками ситуація посилилася насамперед фізичним старінням устаткування, що пов'язане з недостатністю коштів, вкладених у його оновлення. У зв'язку з цим доцільне як освоєння нових технологій, а й підвищення ефективності технологічних процесів, застосовуваних в зрошувальних системах.

До деталей та їх елементів, від ступеню зносу поверхонь яких залежить подальша експлуатація насосу, слід віднести підшипникові та посадкові шийки валу, поверхні опорних і упорних підшипників ковзання, посадкові місця кулькових та роликових підшипників, робочих коліс, захисних втулок.

До основних видів зносу деталей НА слід віднести: абразивний (GOST 27674–88; Jakimov et al., 2017), корозійно-механічний (Pashechko et al., 2017; Chernets et al., 2001), втомлювальний (Kogaev et al., 1991), кавітаційний (Remont) та фретинговий (Tarelnyuk et al., 2005; Martsynkovskyy et al., 2020).

Одним з найбільш важливих вузлів НА, від якості якого залежить надійність та довговічність всього агрегату, є бабітові підшипники ковзання (ПК). Якість поверхневого шару ПК залежить від матеріалу покриття, методу його нанесення, додержання технологічного процесу та ін. Найбільш широко при виготовленні вкладишів підшипників (ВП) використовують антифрикційні сплави на олов'яній і свинцевій основі (бабіти).

Істотним недоліком бабітів є те, що з підвищенням температури знижуються всі показники механічної міцності, особливо опір втомі.

Однією із суттєвих причин виходу ПС з ладу є неякісна заливка бабіту (погане приставання бабіту до поверхні вкладиша, пористість та ін.).

Останніми роками для виготовлення та ремонту ПК набули поширення декілька нових методів: газотермічне напилення, гальванічне нарощування, штампування в температурному інтервалі кристалізації, надзвукове напилення ДИМЕТ (Galiahmetov I.G., 2009; Pometun, 2009; Lebedeva et al., 2003; Barykin et al., 2006; DIMET).

В (Luzan, 2011) якість покриття характеризується такими властивостями: міцністю зчеплення покриття з основою, когезійною міцністю напиленого шару, пористістю, рівномірною товщиною покриття, рівнем залишкових напруг, однорідністю структури та властивостей покриття.

Формування методом електроіскрового легування (ЕІЛ) проміжного шару з міді, міцно зчепленого, з одного боку, зі сталеву підкладкою, а з іншого – з шаром олова (утворення твердих розчинів заміщення) та бабіту, забезпечує більш міцне зчеплення сталеві підкладки з бабітом, а також більш інтенсивне відведення тепла із зони тертя (Tarel'nik et al., 2018). Крім цього, в (Tarel'nyk et al., 2014) був запропонований спосіб нанесення бабітового покриття на сталеві вкладиші ПК повністю методом ЕІЛ.

Інтенсивність зношування деталей машин у забрудненому повітрі в кілька разів вища, ніж при чистому повітрі. При влученні абразивних частинок у підшипники з м'яким антифрикційним шаром вони упресовуються в цей шар (шаржують його) і прискорюють зношування з'єднаного валу (рис. 3, а).

Здатність підшипникового матеріалу працювати при мастильному матеріалі, забрудненому абразивними частинками, є важливою його характеристикою. При відносно товстому шарі бабітової заливки (1,0–1,5 мм) влучення абразивних частинок у підшипник не викликає серйозних відхилень від нормальної роботи (рис. 3, б і в). Однак варто враховувати, що зі збільшенням товщини бабітового шару знижується межа його витривалості.

Іноді при роботі ВН можуть виникнути нештатні ситуації (відхилення від режиму експлуатації, неякісне мастило, попадання в зону тертя іншого тіла і таке інше), що може призвести до значного руйнування бабітових ПК (рис. 3, г і д).

Нерідко з метою більш ефективного захисту від зношення поверхню деталей піддають таким видам зміцнення, як наплавлення твердими та зносостійкими матеріалами, плазмове напилення, хіміко-термічній обробці (ХТО) та ін. Ремонтне зварювання та наплав-

лення деталей машин та механізмів на сьогоднішній день є одними з основних технологічних методів відновлення експлуатаційних властивостей деталей та зміцнення їх поверхонь. До не менш небезпечних методів відновлення деталей слід віднести і плазмове напилення призначене для нанесення покриттів різного призначення за допомогою розпилення порошкових та дротяних матеріалів (Tarel'nyk et al., 2021).

В (Tarel'nik et al., 2021) проведено аналіз впливу науково-технічного прогресу (НТП) на ремонтні технології, які використовують при виконанні поточного та капітального ремонтів сільськогосподарської техніки. Відмічається, що в ремонтних технологіях, як правило, використовують екологічно небезпечні методи наплавлення та зварювання. НТП в ремонтних технологіях значно розширив номенклатуру методів виконання ремонтних робіт новими короткотривалими, екологічно безпечними, енергозберігаючими і маловитратними технологіями, такими як електроіскрове легування (ЕІЛ), нанесення металополімерних матеріалів (МПМ) та поверхневе пластичне деформування (ППД). Крім цього впровадження та використання цих технологій дозволить перерозподілити об'єми ремонтних робіт, шляхом перенесення значної їх кількості з ремонтних баз на підприємства АПК і, таким чином, знизити вантажопотік сільськогосподарської техніки.

Велика кількість технологічних прийомів формування покриттів, широкий спектр матеріалів для цього, а також вплив застосовуваних методів на екологічну безпеку, не дозволяють однозначно вибрати той чи інший метод їх нанесення. Згідно (Tarel'nik et al., 2022) при виборі технологій формування поверхневого шару деталей необхідно враховувати усі стадії життєвого циклу виробу. При цьому враховують як вартісні, так і екологічні вимоги.

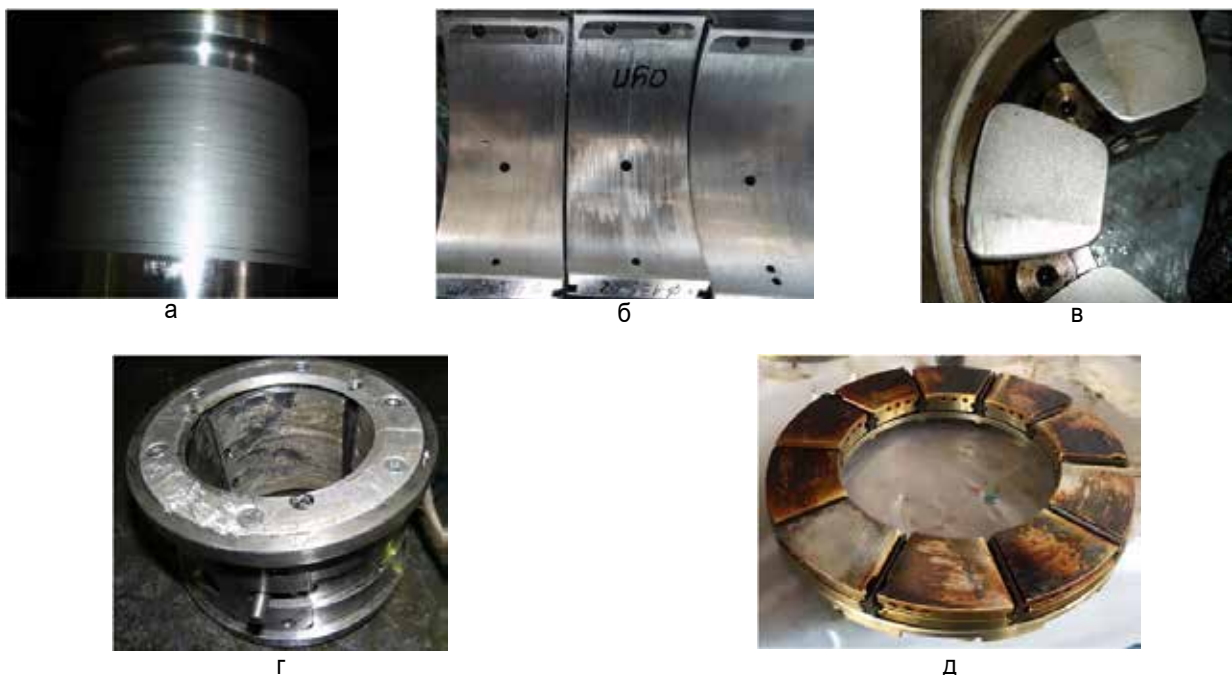


Рис. 3. Опорна шийка ротора (а), колодки опорного (б, г) і упорного (в, д) підшипників ВН після абразивного зношування

Таким чином, серед розглянутих методів відновлення деталей великої уваги заслуговують на ЕІЛ, БУФО та нанесення МПМ, які екологічно безпечні і останнім часом все частіше використовуються у ремонтному виробництві.

Метою роботи є підвищення надійності, довговічності і експлуатаційних властивостей насосних агрегатів систем зрошувального землеробства, за рахунок модернізації приводу і з'єднувальної муфти та спрямованого вибору найбільш ефективних, екологічно та техногенно безпечних технологій нанесення захисних покриттів при виготовленні та відновленні деталей.

Для досягнення поставленої **мети** необхідно вирішити наступні **завдання**:

1. Розробити систему спрямованого вибору найбільш ефективних, екологічно та техногенно безпечних технологій нанесення захисних покриттів, при виготовленні деталей НА.

2. Удосконалити технологію виготовлення і ремонту поверхневих шарів шийок валів роторів відцентрових компресорів під підшипники ковзання та посадкові поверхні деталей що збираються з натягом, шляхом використання екологічно та техногенно безпечних технологій ЕІЛ, ППД і нанесення МПМ.

3. Дослідити кореляційні залежності зносу бабітових покриттів вкладишів підшипників ковзання відцентрових насосів від роботи тертя і на їх підставі розробити математичну модель їх зношування.

4. Дослідити кореляційні залежності параметрів якості поверхневих шарів бабітових покриттів вкладишів підшипників ковзання відцентрових насосів при їх відновлюванні методом ЕІЛ від параметрів роботи обладнання і на їх підставі розробити математичну модель їх відновлення.

5. Удосконалити технологію захисту деталей пружних муфт від фреттинг-корозії з метою впровадження її в НА, які використовують в системах зрошувального землеробства.

6. Розробити технологічні рекомендації екологічно й техногенно безпечного виготовлення й ремонту відповідальних деталей НА, задіяних в системах зрошувального землеробства і впровадити результати досліджень у виробництво.

Методика досліджень. В роботі розроблені методики експериментальних досліджень впливу різних технологій на якість поверхонь деталей НА, задіяних в системі зрошувального землеробства. Розглянуті особливості технології ЕІЛ при реновації бабітових покриттів ПК відцентрових насосів НА. Розроблено гаму методів, спрямованих на удосконалення поверхневих шарів деталей НА як при виготовленні так і при реновації. При цьому, переважно використовували комбінації з екологічно безпечних та мало затратних методів: ЕІЛ, ОК, БУФО, МПМ.

Стійкість шийок валів під ПК і бабітових покриттів, нанесених за різною технологією, оцінювали по втраті ваги та зменшенні товщини зразка на машині тертя СМЦ-2 за схемою «диск-колодка, а відносну зносостійкість зразків для відновлення посадкових поверхонь валу – за схемою «диск – плоский зразок».

Результати досліджень. З метою підвищення надійності і довговічності НА розроблено систему спрямованого вибору екологічно безпечної та найбільш раціональної технології підвищення якості поверхонь їх деталей. При цьому враховують усі стадії їх життєвого циклу, а також економічні та екологічні вимоги.

На підставі встановленої кореляційної залежності між зносом бабітових покриттів ПК відцентрових насосів та роботою, затраченою на тертя, запропоновано фізично обґрунтовану математичну модель процесу зносу (рівняння зносу), яка дозволяє вирішувати як пряму задачу – визначати ваговий та лінійний знос за відомою роботою тертя, так і зворотну – знаходити необхідну роботу тертя для отримання того чи іншого зносу. Знаючи час досягнення певної величини зносу, з'являється можливість більш раціональної експлуатації виробів, своєчасно призначаючи час ремонту не допускаючи до катастрофічного зносу поверхню тертя. В процесі виконання досліджень розроблено методику визначення констант рівняння зносу: енергії активації (ЕА), а також максимального вагового, та лінійного зносу, які можуть бути використані, як критерії вибору найбільш раціональної технології нанесення бабітового покриття.

З метою підвищення надійності і довговічності НА, запропоновано ряд нових технологій покращення якості поверхневих шарів їх деталей. Так, удосконалений метод цементації (C_{EIL}) – ЕІЛ графітовим електродом підшипникових шийок валів роторів відцентрових насосів, при якому в сталі 20 зменшується шорсткість поверхні з $Ra = 9,0$ до $3,2$ мкм; збільшуються суцільність легованого шару з 80 до 100%, глибина дифузійної зони вуглецю з 35 до 70 мкм, мікротвердість «білого» шару і його товщина відповідно з 8492 до 10796 МПа і з 60 до 230 мкм. При заміні сталі 20 на сталь 40Х і 30Х13 мікротвердість «білого» шару і його товщина збільшується, відповідно до 11823 і 10991 МПа та 240 і 240 мкм.

Запропонований новий спосіб сульфомолібденування методом ЕІЛ шийок валів ПК, використання якого при $Wp = 3,4$ Дж призводить до появи в поверхневому шарі сталі 40 до 30% мартенситної фази, до 6% залишкового аустеніту (ГЦК фази), а також до 5% дисульфиду молібдену.

Також запропонований новий спосіб формування методом ЕІЛ на посадочних поверхнях валів зносостійких покриттів складу Al-C-B, при нанесенні яких з підвищенням енергії розряду збільшується мікротвердість «білого» шару: при $Wp=0,13$ Дж – $H_{\mu} = 6487$ МПа, а при $Wp = 4,9$ Дж – 12350 МПа.

Порівняльними дослідженнями на машині тертя СМЦ-2 встановлено, що для підшипникових шийок валів ваговий і лінійний знос круглих зразків з шліфованої сталі 40Х більший чим сталі 30Х13, відповідно в 1,15 і 1,09 рази. Найменший ваговий і лінійний знос у зразків зі сталі 30Х13 з покриттям складу (Mo+S) і БУФО складає, відповідно $0,013 \cdot 10^{-3}$ кг і 0,90 мкм. Для посадкових шийок валів найкращу зносостійкість показали зразки зі сталі 30Х13, зміцнені в послідовності ЕІЛ (Al-C-B) → БУФО; ваговий і лінійний знос яких після 8 год іспитів склав, відповідно, $0,105 \cdot 10^{-3}$ кг і 1,645 мкм.

Розроблені технологічні рекомендації по впровадженню результатів проведених досліджень у виробництво.

– для відновлення, зруйнованого після перешліфовки підшипникової шийки, шару підвищеної твердості, запропонований новий екологічно безпечний спосіб нітроцементації, який включає $C_{EП}$, яка супроводжується подачею в зону легування азоту. Процес нітроцементації характеризується підвищенням мікротвердості з 10500 до 10600 МПа, плавним зниженням її у перехідній зоні, збільшенням глибини зони підвищеної твердості з 120 до 150 мкм, а також зменшенням шорсткості поверхні Ra, з 0,7 до 0,6 мкм;

– запропоновано новий екологічно безпечний спосіб формування зносостійких товстошарових комбінованих електроіскрових покриттів на зношених поверхнях посадкових шийок валів роторів відцентрових насосів, який дозволяє формувати відновлені поверхневі шари товщиною 1,5 мм, суцільністю 100%, мікротвердістю 10100 МПа і шорсткістю Ra = 1,2 мкм. Товщину покриття можна збільшити за рахунок нанесення методом ЕП перед $C_{EП}$ сталі 08X15H5Д2Т;

– з метою покращення ремонту ПК: виявлені залежності характеристик якості поверхневих шарів бабітових покриттів, відновлюваних методом ЕП від енергії розряду, що дозволило проводити реновацію виробів з бабітовими покриттями; запропоновані фізично обґрунтовані математичні моделі (рівняння масопереносу та прогнозування шорсткості поверхневого шару), що дозволяє за енергетичними параметрами обладнання ЕП визначати основні технологічні параметри якості сформованого шару: кількість перенесеного матеріалу, збільшення його товщини та шорсткість поверхні; розроблено методику визначення констант рівнянь масопереносу (енергії активації процесу масопереносу, привіску ваги та приросту товщини нанесеного шару, а також рівняння прогнозування шорсткості поверхні (максимальної шорсткості та енергії активації процесу її формування), які можуть служити критеріями вибору найбільш раціональної технології реновації бабітових покриттів;

– в результаті аналізу умов експлуатації технологічного обладнання, задіяного в технологічному циклі зрошення запропоновано проблеми герметичності підшипникових вузлів приводів НА, вирішити за рахунок їх модернізації шляхом впровадження нового типу ущільнень – магніторідинних герметизаторів;

– з метою заміни традиційних зубчастих і втулочно-пальцевих муфт, що використовують в НА, задіяних в технологічному циклі зрошення, на пружні муфти (ПМ) з гнучкими елементами, які у порівнянні з вище названими, мають ряд важливих переваг: можливість компенсувати радіальні неспіввісності і перекося валів приводу і агрегату, безшумні в роботі, не вимагають мастила і обслуговування в процесі експлуатації, були проведені дослідження направлені на удосконалення останніх. Дослідженнями зносостійкості гнучких елементів ПМ, сформованих в пакети за новим способом, встановлено, що при застосуванні металомасильних матеріалів у вигляді парафіну з добавками з міді,

дисульфиду молібдену і графіту, знос від фретинг-корозії, у порівнянні з прототипом, зменшується на 50%. Для захисту від фретинг-корозії кріпильних деталей ПМ запропонований спосіб епіламування після якого параметри шорсткості поверхонь (Ra, Rz і Rmax), оброблених методом епіламування, у порівнянні з необробленими, знизилась, відповідно, в 1,55; 1,53 і 1,39 рази. Запропонований спосіб не тільки значно підвищує зносостійкість сполучених деталей, а і знижує собівартість процесу;

– отриманні в дійсній роботі технологічні рішення, що використовуються екологічно і техногенно безпечними методами, впроваджені на Комунальному підприємстві «Міськводоканал» Сумської міської ради; ПАТ «Сумихімпром» та ТОВ «ТРИЗ ЛТД», м. Суми з загальним очікуваним економічним ефектом 856000 (вісімсот п'ятдесят шість тисяч) гривен.

Висновки.

1. На сучасному етапі розвитку стан меліоративного землеробства за рівнем використання наявних потужностей інженерної інфраструктури зрошення оцінюється як кризовий, з подальшою загрозою погіршення. Низка значних недоліків, таких як відсутність системного розуміння ролі та місця технічної підсистеми у технологічній системі землеробства на зрошенні; здебільшого пристосовані умови для обслуговування та ремонту обладнання; кадрові проблеми та, як наслідок, некомпетентна експлуатація, обслуговування та ремонт устаткування, перешкоджають отриманню високорентабельної продукції з низькою собівартістю, використанню ресурсозберігаючих технологій та технічних засобів зрошення, що забезпечують рослини оптимальною кількістю води та елементами живлення, а також спрямованими діями на збереження екологічної обстановки в агроландшафтах.

Розроблена в дійсній роботі система спрямованого вибору найбільш ефективних, екологічно та техногенно безпечних технологій підвищення якості поверхневих шарів деталей, при виготовленні насосних агрегатів, яка враховує усі стадії їх життєвого циклу, а також існуючі до них економічні та екологічні вимоги, в значній мірі знижує означені вище недоліки, які передбачають всі зрошувальні системи розглядати як такі, що підлягають модернізації.

2. З метою підвищення надійності і довговічності насосних агрегатів, задіяних в системах зрошення, удосконалена технологія виготовлення і ремонту поверхневих шарів шийок валів роторів відцентрових насосів під підшипники ковзання, та посадкові поверхні деталей що збираються з натягом, шляхом використання екологічно та техногенно безпечних технологій ЕП, ППД і нанесення МПМ. При цьому:

– для покращення параметрів якості поверхонь шийок ПК валів роторів відцентрових насосів:

а) розроблений і апробований новий спосіб цементації їх поверхонь (*патент України на корисну модель № 142822*) при якому шорсткість поверхні зменшується з Ra = 8,3-9,0 до 3,2-4,8 мкм; суцільність легового шару збільшується з 80 до 100%; мікротвердість

«білого» шару і його товщина збільшуються, відповідно з 8492 до 10796 МПа і з 60 до 230 мкм;

б) розроблений і апробований новий спосіб формування методом ЕІЛ сульфомолібденових покриттів (**патент України на корисну модель №144932**), поверхневі шари яких складаються з 4-х ділянок. Зверху – пухкий шар, мікротвердість якого нижче основи – $H_m = 1100-1600$ МПа. Нижче – «білий» шар з мікротвердістю при $W_p = 3,4$ Дж $H_m = 10596-10731$ МПа. Ще нижче дифузійна зона в якій мікротвердість плавно зменшується і переходить в мікротвердість основи. Рентгеноструктурним аналізом встановлено наявність в поверхневому шарі до 5% дисульфиду молібдену;

– для покращення параметрів якості поверхонь посадкових шийок валів роторів відцентрових насосів розроблений і апробований новий спосіб формування на їх поверхнях зносостійких покриттів складу Al-C-B, які наносять методом ЕІЛ (**патент України на корисну модель № 148495**). ДюрOMETричні дослідження показали, що з підвищенням енергії розряду збільшується мікротвердість як «білого» шару, так і дифузійної зони: при $W_p=0,13$ Дж – $H_m = 6487$ МПа, а при $W_p = 4,9$ Дж – 12350 МПа. Нанесення біля торців напресованої деталі, методом ЕІЛ кільцеподібних покриттів шириною 2-5 мм з м'яких металів: срібла, міді або нікелю з подальшою БУФО, збільшує площу контактуючої поверхні до 100%, що не тільки захистить поверхні від Ф-К, а й підвищить герметичність з'єднання та його надійність і довговічність;

– для визначення кращого матеріалу валу і способу зміцнення для протистояння зношуванню, порівняльними дослідженнями встановлено, що ваговий знос зразків з сталі 40X більший чим сталі 30X13 в 1,15 рази і відповідно в 2,50 і 4,41 рази ніж сталі 40X після $C_{EIL} \rightarrow$ БУФО і ЕІЛ (Mo+S) \rightarrow БУФО. Лінійний знос круглих зразків шліфованої сталі 40X більший чим сталі 30X13 в 1,09 рази і відповідно в 2,83 і 5,85 рази ніж сталі 40X після $C_{EIL} \rightarrow$ БУФО і ЕІЛ (Mo+S) \rightarrow БУФО;

– для удосконалення технології відновлення поверхневого шару валу:

а) зруйнованого після перешліфовки шийки ПК шару підвищеної твердості, запропонований новий спосіб, який включає операцію цементації методом ЕІЛ, яка супроводжується подачею в зону легування азоту, що є по суті процесом нітроцементації. Використання нового способу супроводжується підвищенням мікротвердості з 10500 до 10600 МПа, збільшенням глибини зони підвищеної твердості з 120 до 150 мкм, і зменшенням шорсткості поверхні R_a , з 0,7 до 0,6 мкм;

б) на зношених поверхнях посадкових шийок валів роторів відцентрових насосів запропоновано новий екологічно безпечний спосіб формування зносостійких товстошарових комбінованих електроіскрових покриттів (**патент України на корисну модель № 141920**), який дозволяє формувати відновлені поверхневі шари товщиною до 1,5 мм, суцільністю 100 %, мікротвердістю 10100-9500 МПа і шорсткістю $R_a=1,2$ мкм. Товщину покриття можна ще збільшити за рахунок нанесення методом ЕІЛ перед ЦЕІЛ сталі 08X15H5D2T (**патент України на корисну модель № 141919**).

3. На підставі встановленої кореляційної залежності між зносом бабітових покриттів ПК відцентрових насосів та роботою, затраченою на тертя, запропоновано фізично обґрунтовану математичну модель процесу зносу (рівняння зносу), що дозволяє по роботі тертя визначати лінійний та ваговий знос поверхні бабітового покриття, сформованого будь яким методом, а також вирішувати зворотну задачу, що дозволяє знайти величину роботи тертя, необхідну для здійснення зносу певної кількості речовини або для отримання необхідного лінійного зносу. Для різних матеріалів пар тертя (бабітовий вкладиш – шийка ПК) розроблено методику визначення констант рівняння зносу: найбільшого вагового та лінійного зносу, відповідно (Δm_{max}) та (Δh_{max}), а також енергію активації процесу зношування E_A , які можуть бути критеріями вибору найбільш раціональної технології підвищення довговічності підшипника ковзання.

4. Для покращення технології обслуговування і ремонту обладнання, що використовують в системах зрошення, розроблена нова технологія відновлення бабітових покриттів, яка може бути використана для упорних та опорних ПК. При цьому: виявлено кореляційні залежності характеристик якості, відновлюваних методом ЕІЛ бабітових покриттів (ваги перенесеного бабіту на відновлюваний виріб, товщини і шорсткості сформованого шару), від енергії розряду, що дозволяє значною мірою реалізувати методику керування якістю поверхневих шарів, та проводити реновацію виробів з бабітовими покриттями; на підставі експериментальних досліджень запропоновано математичні моделі (рівняння масопереносу та прогнозування шорсткості поверхневого шару), що дозволяють за енергетичними параметрами установки ЕІЛ визначати основні технологічні параметри якості сформованого шару: кількість перенесеного матеріалу (ΔP_k), збільшення його товщини (Δh_c) та шорсткість поверхні (ΔR_z); розроблено методику визначення констант: рівнянь масопереносу (енергії активації процесу масопереносу E , максимальному збільшенню ваги та товщини шару, відповідно ΔP_{kn} та Δh_{cn}), а також рівняння прогнозування шорсткості поверхні (шорсткості насичення ΔR_{an} та енергії активації $E_{\Delta R_z}$).

5. З метою підвищення надійності і довговічності насосних агрегатів, що використовують в системах зрошувального землеробства, удосконалена технологія захисту деталей їх пружних муфт від фреттинг-корозії. При цьому для зменшення до 50% зносу поверхонь гнучких елементів за новим способом (**патент України на корисну модель №151426**), застосовують металомастильні матеріали у вигляді парафіну з добавками з міді, дисульфиду молібдену і графіту; для захисту кріпильних деталей муфт, запропонований новий спосіб (**патент України на корисну модель № 142811**), який включає хіміко-фізичний вплив на поверхневий шар деталей, що контактують епіламу, що дозволяє знизити коефіцієнт тертя в 2–3 рази і, як наслідок, підвищити зносостійкість пар тертя.

6. Розроблені і впроваджені у виробництво технологічні рекомендації виготовлення й ремонту деталей насосних агрегатів, задіяних в системах зрошувального землеробства економічними, енергоощадними і екологічно й техногенно безпечними технологіями, захищеними 10 патентами України із загальним економічним ефектом 856 тис. грн.

Бібліографічні посилання:

1. Bolotskykh O.S., Bondarenko H.P., Skliarevskiy M.O. ta in. (1988) Operatsiina tekhnolohiia vyrobnytstva ovochiv [Operational technology of vegetable production] / Za red. O.S. Bolotskykh. K. : Urozhai. 344 s (in Ukrainian).
2. Bilonozhko M.A., Shevchenko V.P., Alimov D.M. ta in. (1990) Roslynnnytstvo. Intensyvna tekhnolohiia vyroshchuvannia polovykh i kormovykh kultur [Plant growing. Intensive technology for growing field and fodder crops] / Za red. M.A. Bilonozhka. K. : Vyshcha shkola. 292 s (in Ukrainian).
3. Voitiuk D.H. Dubrovin V.O., Ishchenko T.D. ta in. (2004) Silskohospodarski ta melioratyvni mashyny [Agricultural and reclamation machines] / Za red. D.H.Voitiuka. K. : Vyshcha shkola. 544 s (in Ukrainian).
4. Kovalskyi V. (2019) Systema zroshuvalnoho zemlerobstva v Ukraini: problemy, vartist ta shliakhy vyrishennia [Irrigation farming system in Ukraine: problems, cost and solutions] *Landlord* URL: <https://landlord.ua/news/systema-zroshuvalnoho-zemlerobstva-v-ukraini-problemy-vartist-ta-shliakhy-vyrishennia/> (in Ukrainian).
5. Triahobchuk V.I. (2006) Innovatsiino-investytsiinyi rozvytok natsionalnoho APK: problemy, napriamy, mekhanizmy [Innovative and investment development of the national agricultural industry: problems, directions, mechanisms] *Ekonomika Ukrainy*. 2. 4–12 (in Ukrainian).
6. Dmitriiev A.F., Khlapak M.M., Shuminskyi V.D. ta in. (1999) Hidrotekhnichni sporudy. Pidruchnyk dlia vuziv [Waterworks. Textbook for universities] / Za redaktsiieu A.F. Dmytriieva. Vyd-vo Rivnenskoho derzhavnogo tekhnichnoho universytetu. 328 s (in Ukrainian).
7. Zaydelman F. R. (2003) Melioratsiya pochvy [Soil reclamation]. M. : Izd-vo MGU. 448 s. (in Russian).
8. Harkavyi A.D., Sereda L.P., Kondratiuk O.M. (2007) Mashynovykorystannia u roslynnnytstvi: Navch. posibn [Machine use in crop production: Study guide]. Vinnytsia. VDAU. 48 s (in Ukrainian).
9. Kuzmenko V.D., Volochniuk Ye.H. (2019) Zroshennia silskohospodarskykh kultur doshchuvanniam [Irrigation of agricultural crops by sprinkling.]. Kherson : VV KhDAU. 76 s (in Ukrainian).
10. Sad-Gorod (2021) 9 osnovnykh prichin polomki kapelnogo orosheniya [9 main reasons for the breakdown of drip irrigation] URL: <https://sad-ogorod.in.ua/ua/stati/kapelnoe-oroshenie-ua/9-osnovnykh-prichin-polomki-kapelno-go-orosheniya-ua/> (in Russian).
11. Senchenko I.O. Nasosy dlia systemy zroshennia – vydy, perevahy [Pumps for the irrigation system – types, advantages] *Stroytechnology.net – budivelni tekhnolohii*. URL: <http://stroytechnology.net/budivelni-roboty/485-nasosy-dlasystemy-zrochena.html> (in Ukrainian).
12. PrAT "Epos" – nasosy ta nasosne obladnannia [PJSC "Epos" – pumps and pumping equipment] *PrAT "Epos"*. URL: <https://pratepos.com.ua/> (in Ukrainian).
13. Chermenskiy O. N. Fedotov N. N. (2003) Podshipniki kacheniya: spravochnik-katalog [Rolling bearings: directory-catalogue] M. : Mashinostroenie. 576 s. (in Russian).
14. Hasselferd Z. (2017) Pravilnyiy vybor zaschitnykh uplotneniy podshipnikov. [The right choice of protective seals for bearings] *Himicheskaja tehnika*. 9. 16–17. (in Russian).
15. Radionov A.V., Vinogradov A.N., Gornov V.A. i dr. (2004) Asinhronnyie dvigateli serii BACO4s magnitozhidkostnyimi germetizatorami [Asynchronous motors of the BACO4 series with magnetic liquid seals]. *Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*. №3. S 29–32 (in Russian).
16. GOST 27674–88. Trenie, iznashivanie i smazka. Terminy i opredeleniya [Friction, wear and lubrication. Terms and Definitions] (in Russian).
17. Yakimov S. V., Ivanovskiy V. N., Degovtsov A. V., Eliseev D. V., Aygishev E. V. (2017) O vliyanii fraktsionnogo sostava abrazivnykh chastits v dobyvaemoy zhidkosti na vidu iznosa detaley elektrotsentrobezhnykh nasosov. [On the influence of the fractional composition of abrasive particles in the produced fluid on the types of wear of parts of electric centrifugal pumps]. *Territorija «NEFTEGAZ»*. 11. 32–38. (in Russian).
18. Paschenko M. I., Golubets V. M., Chernets M. V. (1992) Formirovanie i friktsionnaya stoykost evtekticheskikh pokrytuy [Formation and friction resistance of eutectic coatings]. K. : Naukova dumka. 344 s (in Russian).
19. Chernets M.V., Pashechko M.I., Nievchas A. (2001) Metody prohnozuvannia ta pidvyshchennia znosostiikosti trybotekhnichnykh system kovzannia. 3t. [Methods of forecasting and increasing the wear resistance of tribotechnical sliding systems. with]. Drohobych: Kolo. 512 s. (in Ukrainian).
20. Kogaev V. P., Drozdov Yu. N. (1991) Prochnost i iznosostoykost detaley mashin [Strength and wear resistance of machine parts]. M. : Vysshaja shkola. 319 s (in Russian).
21. Remont teplovoznnykh i teplokhidnykh rozpyliuvachiv forsunok [Repair of locomotive and locomotive spray nozzles] URL: <https://prom.ua/ua/p1061832522-remont-teplovoznnyh-teplohodnyh.html> (in Ukrainian).
22. Tarellyk V.B., Martsynkovskiy V.S., Bratushchak M.P. (2005) Problemy zakhystu hnuchkykh muft turbokompresoriv vid fretynh-korozii [Problems of protecting flexible couplings of turbocompressors from fretting corrosion]. *Visnyk SNAU*. 12. 231–240 (in Ukrainian).
23. Martsynkovskyy V., Tarellyk V., Konoplianchenko I., Gaponova O., Dumanchuk M. (2020) Technology Support for Protecting Contacting Surfaces of Half-Coupling–Shaft Press Joints Against Fretting Wear. In: Ivanov V. et al. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_22

24. Galiahetov I.G. (2009) Konstruktivnye materialy tsentrobeznyih i vintovyih kompressorov. Vyibor i tehnologiya ih primeneniya. [Structural materials of centrifugal and screw compressors. The choice and technology of their application] Kazan': Izd-vo «FON». 155 s (in Russian).
25. Pometun S.K. (2009) Opyit OOO "TSZP" po uvelicheniyu resursa oborudovaniya metodami gazotekhnicheskogo napyileniya [The experience of TSZP LLC in increasing the resource of equipment using thermal spraying methods]. *Himicheskaja tehnika*. 4. 8–9 (in Russian).
26. Lebedeva A.P., Pogorelova T.N. (2003) Vosstanovlenie detaley mashin [Restoration of machine parts] – M. : Mashinostroenie. 672 s (in Russian).
27. Barykin N.P., Fazlyahmetov R.F. (2006) Izgotovlenie podshpnikov skolzheniya s primeneniem shtampovki anti-friktsionnogo sloya v usloviyah kristallizatsii i posleduyushey plasticheskoy deformatsii [Production of plain bearings using stamping of an antifriction layer under conditions of crystallization and subsequent plastic deformation]. *Kuznechno-shtampovnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 9. 27–29 (in Russian).
28. DIMET – novaya tehnologiya naneseniya metallicheskih pokryitij [OOO «Obninskiy tsentr poroshkovogo napyileniya»]. [DIMET – a new technology for applying metal coatings [LLC Obninsk Center for Powder Spraying]]. *Himicheskaja tehnika*. – (2010). 5. 29 (in Russian).
29. Luzan S.O. (2011) Predlagaemye obschie printsipy upravleniya kachestvom gazoplamennyih pokryitij pri vosstanovitelnom remonte detaley [Suggested General Principles of Quality Control of Gas-Flame Coatings in the Reconditioning of Parts]. *Mehanika ta mashinobuduvannja*. 2. S. 211–219. (in Russian).
30. Tarel'nik V.B., Paustovskii A.V., Tkachenko Yu.G., Martsinkovskii V.S. et al. (2018) Electrospark Graphite Alloying of Steel Surfaces: Technology, Properties, and Application. *Surf Eng Appl Electrochem*. 54(2), 147–156. doi: 10.3103/S106837551802014X.
31. Tarel'nyk V., Martsynkovskyy V., Dziuba A. (2014) New Method of Friction Assemblies Reliability and Endurance Improvement. *Appl Mech Mater*. 630, 388–396. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.630.388.
32. Tarel'nyk, V.B., Gaponova, O.P., Loboda, V.B., Konoplyanchenko, E.V., Martsinkovskii, V.S., Semirnenko, Yu.I., Tarel'nyk, 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. *Surf. Engin. Appl. Electrochem*. 57, 173–184. <https://doi.org/10.3103/S1068375521020113>.
33. Tarel'nik V.B., Solar'ov O.O., Tarel'nik N.V. i Voloshko T.P. (2021) Znizhennja intensivnosti avtomobil'nih perevezen' v sistemi tehničnogo obslugovuvannja j remontu mashin agropromislovogo kompleksu [Reducing the intensity of road transport in the system of maintenance and repair of machines of the agro-industrial complex]. *Naukovij zhurnal «Inzhenerija prirodokoristuvannja»*. 3(21), s. 21–31. doi: 10.37700/enm.2021.3(21). 21–31 (in Ukrainian).
34. Tarel'nik V.B., Dumanchuk M.Ju., Pirogov V.O. (2022) Zastosuvannja sistemnogo pidhodu dlja upravlinnja jakistju poverhnevih shariv detalej nasosnih agregativ [Application of a system approach to quality control of the surface layers of parts of pumping units]. *The 5th International scientific and practical conference – Modern research in world sciencell* (August 7-9, 2022) SPC – Sci-conf.com.ua, Lviv, Ukraine. 2022. pp. 256–262. (in Ukrainian).

Tarel'nyk V. B., Doctor of Technical Sciences, Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Pirogov V. O., Postgraduate, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Increasing the durability of pump units used in irrigation systems by combined environmentally safe technological methods

The article analyzes the current state of reclamation agriculture.

In order to increase the reliability and durability of pumping units (PU) used in irrigation systems, the technology of manufacturing and repairing the surface layers of the centrifugal pumps (CP) rotor shafts necks under sliding bearings (SB) and the landing surfaces of parts that are assembled with tension has been improved by using ecologically and technologically safe technologies of electrospark alloying (ESA), surface plastic deformation (SPD) and application of metal-plastic materials (MPM). At the same time: a) a new method of cementing their surfaces using the ESA method was developed and tested, which improves the quality parameters of the surface layer; b) a new method of forming sulfomolybdenum coatings using the ESA method was developed and tested, the surface layer of which contains up to 5% molybdenum disulfide. A new method of forming wear-resistant coatings of Al-C-B composition on the bearing necks of CP rotor shafts by the ESA method has been developed, in which the microhardness of both the "white" layer and the diffusion zone increases with increasing discharge energy (W_p): at $W_p=0.13$ J – $H_{\mu} = 6487$ MPa, and at $W_p = 4.9$ J – 12350 MPa. To improve the technology of restoration of the surface layer of the shaft, a new method is proposed, which includes the cementation operation by the ESA method, which is accompanied by the supply of nitrogen to the doping zone, which is a nitrocementation process in which the microhardness increases from 10,500 to 10,600 MPa and the depth of the increased hardness zone from 120 to 150 μm . and the surface roughness R_a also decreases, from 0.7 to 0.6 μm . A physically based mathematical model of the wear process (wear equation) is proposed, which allows to determine the linear and weight wear of the babbitt coating surface, formed by any method based on the work of friction, as well as to solve the inverse problem – it allows to find the amount of friction work necessary to carry out the wear of a substance certain amount or required linear wear. For different materials of friction pairs (babbitt insert – SB neck), a method of determining the constants of the wear equation: the largest weight and linear wear, as well as the activation energy of the wear process, which can be criteria for choosing the most rational technology for increasing the durability of the SB, has been developed. To improve the technology of maintenance and repair of equipment used in irrigation systems, a new technology for restoring babbitt coatings has been developed, which can be used for thrust and support SBs. Advanced technology for protecting parts of their elastic couplings from fretting corrosion.

At the same time, in order to reduce the wear of the surfaces of flexible elements by up to 50% according to a new method, metal-lubricating materials in the form of paraffin with additives of copper, molybdenum disulfide and graphite are used; to protect the coupling fastening parts, a new method, epilation, is proposed, which allows to reduce the coefficient of friction by 2–3 times.

Developed and implemented in production technological recommendations for the manufacture and repair of PU parts economical, energy-saving and ecologically and technogenically safe technologies, protected by 10 patents of Ukraine with a total economic effect of 856 thousand UAH.

Key words: irrigated agriculture, pump unit, centrifugal pump, bearing, elastic coupling, shaft necks, wear, restoration, renovation, modernization.