

СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

МАЙФАТ МИКОЛА МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 621.9.048.4; 621.867.42

ДИСЕРТАЦІЯ

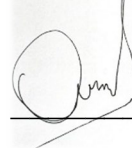
**ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАХИСТУ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, ЩО
ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ ГІДРОАБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ,
ВИСОКОЕФЕКТИВНИМИ ВЗАЄМОДОПОВНЮЮЧИМИ
КОМБІНОВАНИМИ МЕТОДАМИ**

133 – Галузеве машинобудування

13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



М. М. Майфат

Науковий керівник

Тарельник В'ячеслав Борисович

доктор технічних наук, професор

СУМИ – 2024

АНОТАЦІЯ

Майфат М.М. Технологічне забезпечення захисту деталей машин, що працюють в умовах гідроабразивного зношування, високоефективними взаємодоповнюючими комбінованими методами. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 13 – Механічна інженерія за спеціальністю 133 – Галузеве машинобудування. – Сумський національний аграрний університет, Суми, 2024.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-технічної проблеми в області галузевого машинобудування: розробка інноваційних, короткотривалих, енергоощадних та екологічно безпечних технологій поверхневого зміцнення та відновлення деталей машин, працюючих в умовах інтенсивного гідроабразивного зношування. Рішення цієї проблеми допоможе підвищити надійність і довговічність машин шляхом зростання строку служби їх відповідальних деталей, та знизити енерговитрати, що є дуже важливим для сучасної України.

Об'єкт дослідження – технологічний процес формування функціональних покриттів на поверхні деталей машин та їх елементів, працюючих в умовах гідроабразивного зношування.

Предмет дослідження – закономірності технологічного процесу формування поверхневого шару із заданими експлуатаційними властивостями, що забезпечують необхідну якість (довговічність, екологічну безпеку, зносостійкість, працездатність) деталей машин та їх елементів, працюючих в умовах гідроабразивного зношування.

Мета та завдання досліджень

Метою роботи є підвищення зносостійкості поверхневих шарів деталей машин і їх елементів, працюючих в умовах інтенсивного гідроабразивного зношування, шляхом екологічно безпечного нанесення на їх поверхні композиційних зносостійких покриттів, сформованих методом електроіскрового

легування, з наступною обробкою металополімерними матеріалами, армованими порошками з карбїду вольфраму, нїтриду цирконїю, або їх сумїшшю.

Для виконання поставленої мети потрібно вирішити наступні **завдання**:

1. Провести аналіз причин зношування деталей машин, поверхні яких в процесі роботи контактують з абразивом, що знаходиться в потоках рідини і других важких умовах оточуючих середовищ.

2. Провести аналіз існуючих технологічних методів захисту сталєх і чавунних деталей машин від гїдроабразивного і інших видів зношування і вибрати бїль раціональні.

3. Оцінити можливість використання методу ЕІЛ з застосуванням спеціальних технологічних насичуючих середовищ (СТНС) для захисту сталєх і чавунних деталей машин від гїдроабразивного і інших видів зношування.

4. Розробити систему направленої вибору технології захисту деталей машин від гїдроабразивного і інших видів зносу.

5. Провести порівняльні випробування сталєх і чавунних зразків з різними захисними покриттями на гїдроабразивний знос.

6. Розробити технологічні рекомендації екологічно й техногенно безпечного виготовлення й ремонту деталей машин, поверхні яких в процесі роботи підлягають гїдроабразивному і другим видам зношування і впровадити результати досліджень у виробництво.

У вступі обґрунтований вибір теми дисертації та наукових завдань, сформульовані мета й завдання дослідження, визначені наукова новизна й практичне значення одержаних результатів, а також наведена інформація про апробацію, структуру та обсяг роботи.

У першому розділі визначено, що серед усіх машин і пристроїв, що працюють в різних галузях промисловості України і інших господарств, дуже велика кількість підлягає газоабразивному зносу (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.

Також літературним і патентним аналізом встановлено, що виготовлення і особливо відновлення деталей відбувається, як правило, екологічно небезпечними технологіями: зварюванням, наплавленням, напиленням тощо. Все це дозволило сформулювати мету й завдання для подальших досліджень.

У другому розділі удосконалений системний підхід до вибору технологій управління параметрами якості поверхонь деталей машин, що працюють в умовах ГЗ. Завдяки теоретичним дослідженням розроблена формалізована методика визначення оптимального варіанту технології виготовлення і ремонту деталей машин. При цьому кожен варіант реалізується можливими комбінаціями рішень мінімізованими з економічних і екологічних показників.

В результаті аналізу факторів, які впливають на знос електроіскрових покриттів (ЕІП) поверхонь досліджуваних деталей машин (ротора гвинтового компресора (ГК), захисної втулки (ЗВ) масляного ущільнення та корпусу компресора (КК)) встановлено, що зі збільшенням енергії, витраченої на руйнування поверхневого шару їх робочих поверхонь об частинки абразиву, що знаходяться в потоці рідини, ефективність зношування збільшується, що пов'язано з розподілом твердості покриття по глибині. При повному зносі захисного ЕІП інтенсивність зношування різко зростає, що позначається на зниженні ККД обладнання. Експериментальними дослідженнями встановлено, що кореляційні залежності вагового, $\Delta m_{H3+ГЗ}$ і лінійного $\Delta h_{H3+ГЗ}$ зносу покриттів досліджуваних деталей машин від величини енергії, витраченої на руйнування поверхневого шару E_T , в першому наближенні нагадують експоненціальні залежності.

Отримані рівняння вагового та лінійного зносу захисних електроіскрових покриттів відповідальних деталей машин і запропонований алгоритм для визначення їх констант (максимального вагового зносу $\Delta m_{H3+ГЗ}$ і максимального лінійного зносу $\Delta h_{H3+ГЗ}$ і енергії активації процесу зносу E_A). Запропоновано методику, що дозволяє інженерно технічним працівникам ремонтних служб визначати час зносу зміцненого шару або нанесеного покриття на поверхні досліджуваних деталей машин і зупинки обладнання для проведення ремонтних робіт.

У третьому розділі, на зразках зі сталі 45, Р6М5 і високоміцного кулястого чавуну марки ВЧ50, досліджували параметри якості нанесених захисних покриттів. Для досліджень використовували середньовуглецеву нелеговану сталь 45, як найбільш поширену для виготовлення деталей машин. Вона використовувалась у покращеному стані з твердістю основи 280НВ та сорбітною структурою. При цьому мали на меті максимально виключити вплив легування підкладки (катода) на структуроутворення шару та вивчити принцип формування структури поверхневого шару на металевих підкладках із переходом від залізної нелегрованої основи (сталь 45) до багатокомпонентної складно легованої швидкорізальної сталі Р6М5 де сума легуючих елементів сягає 16 - 18% Сталь Р6М5 використовують переважно для виготовлення металорізального інструменту, який під час роботи також піддається гідроабразивному зношуванню. Твердість зразків сталі Р6М5 після остаточної термообробки становила до 64 HRC. Крім сталей, для дослідження в якості матеріалу катода використовували зразки з високоміцного кулястого чавуну марки ВЧ50 і ВЧ60, основні механічні характеристики якого: $\sigma_{0,2}=370...500$ МПа, $\delta=2...7$ %, твердість за шкалою Брінелля 153...360 НВ.

При дослідженні масопереносу використовували зразки з високоміцного чавуну ВЧ 50 розміром 10×10×8 мм. Анодом були компактні ЕІ, виготовлені методом порошкової металургії (ПМ) складу: 90% ВК6 + 10% 1М) і 1М - 70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% В. Також використовували компактні ЕІ з твердого сплаву ВК6 і ніхромового дроту марки Х20Н80, при використанні яких на зразки попередньо наносили СТНС.

Для дослідження структури та вимірювання мікротвердості поверхневого шару використовували шліфи зразків сталі 45 і Р6М5 і чавуну ВЧ50 розміром 10×10×8 мм. ЕІЛ зразків відбувалося з енергією розряду, $W_p=0,52; 1,3$ і $2,6$ Дж і з продуктивністю, $Q=1,0; 1,5$ і $2,0$ см²/хв на установці з ЕІЛ "Елітрон-52А".

В якості ЕІ використовували ніхромовий дріт Х20Н80 Ø3мм і пластини, розміром 2×3×30 мм з твердого сплаву ВК6. При ЕІЛ електродами з дроту Х20Н80 на зразки попередньо наносили СТНС, згідно 2-х варіантів: 1-й : 5% Si+ 5% В+90% вазелін; 2-й: 0,5% Si+0,5% В+59% ВК6+40% вазелін. При ЕІЛ ЕІ з

твердого сплаву ВК6 на зразки наносили СТНС складу: 0,5% Si+0,5% В+2% Cr+7% Ni+90 % вазелін.

Після ЕІЛ для підвищення параметрів якості поверхневих шарів (зниження шорсткості покриттів, підвищення суцільності і втомної міцності, зміни характеру залишкових напружень з розтягуючих на стискаючи) використовували безабразивну ультразвукову фінішну обробку (БУФО).

Металографічні і дюрOMETричні дослідження, визначення шорсткості, сформованих поверхневих шарів, мікрорентгеноспектральний аналіз, а також дослідження впливу методу ЕІЛ на механічні властивості деталі проводили по стандартним методикам та на відповідному обладнанні.

Металографічними дослідженнями встановлено, що поверхневі шари сталі 45 і Р6М5 після нанесення зносостійких покриттів мають структуру, яка складається з трьох ділянок: зверху «білий» шар, нижче перехідна зона і основний метал. При збільшенні енергії розряду зростають товщина «білого» шару і перехідної зони, а також мікротвердість і шорсткість поверхні, але суцільність зменшується. Найвища мікротвердість 12800 і 14600 МПа належить покриттям сформованим, відповідно, на сталі 45 і Р6М5 при ЕІЛ компактними ЕІ з твердого сплаву ВК6 і СТНС складу 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7% Ni+90% вазелін.

При нанесенні покриттів на чавун марки ВЧ50, як компактними ЕІ, складу 90% ВК6 + 10% 1М і 1М так і ЕІ з з твердого сплаву ВК6 і ніхромового дроту Х20Н80 з використанням СТНС, структура поверхневого шару складається з трьох ділянок «білий» і перехідний шари, товщиною, відповідно 15-75 і 10-20 мкм і основний метал. Найвища мікротвердість, відповідно 13260 і 12800 МПа, отримана при використанні компактних ЕІ з твердого сплаву ВК6 і ніхромового дроту Х20Н80 та використанням СТНС, а товщина їх шару підвищеної твердості досягає, відповідно 50 і 90 мкм.

В результаті дослідження масопереносу при ЕІЛ зразків з чавуну марки ВЧ50, встановлено: зі збільшенням часу легування збільшується кількість перенесеного матеріалу, з аноду, (Δm_a) на катод, (Δm_k), а шорсткість і суцільність покриття практично не змінюється; найбільша кількість матеріалу переноситься з початку процесу ЕІЛ, потім процес масопереносу поступово зменшується,

зовсім припиняється і може змінитись руйнуванням нанесеного шару, тобто Δm_k , стає від'ємним ($-\Delta m_k$); зі збільшенням W_p процес масопереносу збільшується, але процес руйнування нанесеного шару покриття розпочинається раніше, при цьому збільшується шорсткість покриття і зменшується його суцільність; при незмінній енергії розряду за рівні проміжки часу кількість втраченої ваги (ерозії) аноду, Δm_a майже не змінюється.

Мікрорентгеноспектральним аналізом встановлено, що поверхня покриттів складається з їх хімічних елементів і незначної кількості заліза, що входить в склад зразків. Кількість легуючих елементів, які знаходяться в покритті, по мірі заглиблення поступово зменшується і на глибині ~ 50 мкм для покриттів складу 90% ВК6 + 10% 1М і твердого сплаву ВК6 та елементів СТНС і, відповідно 60 і 70 мкм, для покриттів складу 1М і ніхромового дроту Х20Н80 та елементів СТНС, повністю зникає, а кількість заліза збільшується.

В четвертому розділі були проведені порівняльні випробування зразків сталі 45 і Р6М5, зміцнених компактними ЕІ, виготовленими методом ПМ, складу 90% ВК6 + 10% 1М і 1М, а також компактними ЕІ з твердого сплаву ВК6 і ніхромового дроту Х20Н80, з використанням СТНС, проти гідроабразивного зносу. В результаті встановлено, що кращою стійкістю володіють зразки з покриттям нанесеним методом ЕІЛ ЕІ з твердого сплаву ВК6 з використанням СТНС складу 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін, знос яких на 122 і на 43 % менше ніж у зразків без покриття, відповідно для сталі 45 і Р6М5. Аналіз ефективності процесу зношування показав, що зі збільшенням часу знос, за рівні проміжки часу, поступово збільшується.

Для дослідження впливу параметрів обробки методом ЕІЛ і БУФО на механічні властивості деталей проводили зміцнення зразків методом ЕІЛ на установці моделі «Елітрон-52А» в два етапи: 1-й при $W_p=2,6$ Дж і $Q=2,0$ см²/хв.; 2-й при $W_p=0,13$ Дж і $Q=0,5$ см²/хв. При ЕІЛ в один етап ЕІ, виготовленими методом ПМ, деталей зі сталі 45 і сталі Р6М5 супроводжується зниженням межі міцності (σ_b) і межі плинності (σ_T), відповідно, на 11,8 і 7,7 % та 11,5 і 7,1 %, а відносне подовження (δ) і відносне звуження (ψ) зростає, відповідно, на 12,5 і 2,5 % та 8,0 і 6,9%. Шорсткість поверхневого шару зростає з $Ra=0,5$ до $Ra=5,3-6,5$

мкм, а суцільність покриття складає 70-80 %. При нанесенні покриттів, сформованих в два етапи, шорсткість поверхні збільшується з $Ra=0,5$ до $Ra=1,9-2,0$ мкм, а суцільність покриття збільшується до 90 % і, як результат, σ_b і σ_t зменшується, для сталі 45 і сталі Р6М5, відповідно на 5,1 і 4,0 та 2,7 і 2,4 %, а δ і ψ зростає, відповідно $\sim$ на 9,4 і 1,3 % та 5,8 і 5,0 %. При нанесенні покриттів, сформованих в два етапи і проведення БУФО шорсткість поверхні становиться ще меншою $Ra=1,9-2,0$ мкм, суцільність покриття збільшується до 95 %. В результаті σ_b і σ_t збільшуються, для сталі 45 і сталі Р6М5, відповідно на 2,8 і 3,1 та 2,0 і 1,8 %, а δ і ψ зменшуються, відповідно на 1,3 і 0,9 % та 0,8 і 0,7 %.

При нанесенні покриттів з використанням ЕІ з дроту Х20Н80 і твердого сплаву ВК6 та СТНС, як за один етап, так і в два етапи, зниження σ_b і σ_t значно менше, і складає, відповідно 8,2 і 4,9 та 2,7 і 2,4% і 8,8 і 4,4 та 4,5 і 1,8 %, а δ і ψ зростає також менше, відповідно на 11,9 і 1,7 та 9,4 і 1,0 % й 8,0 і 6,9 та 5,6 і 4,8%. При подальшій БУФО зростання σ_b і σ_t збільшуються, для сталі 45 і сталі Р6М5, відповідно на 4,9 і 4,6 та 3,5 і 2,7 %, а δ і ψ зменшуються, відповідно на 1,7 і 1,3 та 2,0 і 1,7 %. Шорсткість поверхні зменшується до $Ra=1,1$ мкм, а суцільність складає 100 %. До практичної реалізації пропонуються зносостійкі покриття, сформовані за новою технологією, з використанням ЕІ з дроту Х20Н80 і твердого сплаву ВК6 та СТНС в два етапи з наступною БУФО, зростання σ_b і σ_t яких збільшуються, для сталі 45 і сталі Р6М5, відповідно на 4,9 і 4,6 та 3,5 і 2,7 %, а δ і ψ зменшуються, відповідно на 1,7 і 1,3 та 2,0 і 1,7 %. Шорсткість поверхні при цьому складає $Ra=1,1$ мкм, а суцільність - 100%.

Електроіскрове легування ЕІ складу (90% ВК6 + 10% 1М) і 1М, виготовленими методом ПМ, зразків з ВЧ60 при $W_p=0,55$ Дж і $Q=0,67$ см²/хв супроводжується зниженням σ_t і σ_b , відповідно на 32,0 і 32,78 % і 34,0 і 28,7 %, а δ , при цьому, зростає на 5,71 і 5,43%. Шорсткість поверхневого шару збільшується з $Ra=0,5$ до 3,2 і 3,3 мкм, а суцільність покриття (S) складає, відповідно 60 і 80 %. Після обробки БУФО σ_t і σ_b збільшуються, відповідно до 325 і 324,1 та 512 і 526 МПа, а δ , зменшується, відповідно до 1,16 і 2,14 %. Шорсткість поверхні зменшується до $Ra=0,8$ і 0,7 мкм, а S збільшується і складає 70 і 90 %. При ЕІЛ зразків з високоміцного чавуну ВЧ50 ЕІ з дроту Х20Н80 і

твердого сплаву ВК6 та з використанням СТНС, зниження σ_t і σ_b менше, і складає, відповідно 26,3 і 21,87 та 33,16 і 33,58%, а δ також зменшується і складає, відповідно 2,86 і 3,57 %. При подальшій БУФО зростання σ_t і σ_b збільшуються, відповідно до 341,1 і 335,4 та 538,2 і 532,1 МПа, а δ зменшується, відповідно на 4,0 і 3,0 %. Шорсткість покриття зменшується до $Ra=0,8$ і $0,7$ мкм, а S складає, відповідно 100 і 95 %.

При збільшенні W_p з 0,55 до 1,3 і 3,4 Дж і використанні компактних ЕІ складу (90%ВК6+10%1М) і 1М, виготовлених методом ПМ та ЕІ з твердого сплаву ВК6 і ніхромового дроту Х20Н80 з використанням СТНС σ_t зменшується при $W_p=1,3$ Дж до: 211,3; 225,7 МПа, а при $W_p=3,4$ Дж до 205,3 і 211,4 МПа, σ_b при $W_p=1,3$ Дж до 375,3 і 349,2, а при $W_p=3,4$ Дж до 321,2 і 325,2 МПа, δ , при цьому, збільшується, відповідно до: 7,15 і 7,17 та 7,20 і 7,18%. Шорсткість покриття збільшується при $W_p=1,3$ Дж до $Ra=3,7$; 3,9; 4,2 і 4,3 мкм, а при $W_p=3,4$ Дж до $Ra=6,0$; 6,3; 6,7 і 7,5 мкм. Суцільність зменшується при $W_p=1,3$ Дж до $S=55$; 70; 85 і 80 %, а при $W_p=3,4$ Дж, до $S=45$; 50; 70 і 65 %. Після наступної БУФО σ_t збільшується при $W_p=1,3$ Дж до: 321; 321,5; 325,1 і 324,4 МПа, а при $W_p=3,4$ Дж до 320,5; 320,9; 323,1 і 322,8 МПа, σ_b збільшується при $W_p=1,3$ Дж до 506 і 507 МПа, а при $W_p=3,4$ Дж до 502,1; 503,6; 505,8 і 504,9 МПа; δ , при цьому, зменшується, відповідно до: 6,89 і 6,81 та 6,75 і 6,59 %. Шорсткість покриття зменшується при $W_p=1,3$ Дж до $Ra=0,8$; 0,8; 0,9 і 0,9 мкм, а при $W_p=3,4$ Дж до $Ra=1,2$; 1,3; 1,4 і 1,5 мкм, а S збільшується, відповідно до 60, 75, 85 і 80 та 55, 65, 80 і 75 %.

В результаті проведених досліджень запропонована нова технологія, яка забезпечує підвищення здатності деталей чинити опір зношуванню, гарантує надійність і довговічність їх роботи в агресивних середовищах, екологічну безпеку і скорочення витрат на їх виготовлення. Кращою стійкістю володіють зразки з сталі 12Х18Н10Т, з покриттями: ЦЕІЛ $\rightarrow$ ЕІЛ А1 $\rightarrow$ ЕІЛ (90%ВК6+10%1М) $\rightarrow$ МПМ (80% ZrN), знос яких у порівнянні із зразками зі сталі 45 менший на 37,3%, на 96,7% менше зразків без покриття, на 38,7% менше в порівнянні з аналогом і, відповідно, на 6,5 і на 9,7%, менше покриттів, МПМ яких, армовані сумішшю (40%WC+40%ZrN) і 80% WC). Для високоміцного

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

Отриманні в дійсній роботі технологічні рішення, що використовуються екологічно і техногенно безпечними методами, впроваджені на ПАТ «НВАТ ВНДІКОМПРЕСОМАШ», АТ «СМНВО ІНЖІНІРИНГ» та ТОВ «ТРІЗ ЛТД», м. Суми з загальним очікуваним економічним ефектом 405000 (чотириста п'ять тисяч) гривень.

Відповідно до поставленої мети та задач у роботі отримані наступні **результати:**

1. В результаті аналізу роботи машин і пристроїв газо-нафтової, гірничодобувної, металургійної, хімічної, сільськогосподарській, транспортної та інших галузях промисловості, встановлено, що більшість із них працює в важких умовах оточуючих середовищ і підлягають інтенсивному зношенню, внаслідок контакту з абразивом, що знаходиться в потоках рідини і крім гідроабразивного підлягають також іншим видам зношування: корозії, ерозії, кавітації, біологічному пошкодженню тощо.

2. На сьогодні для захисту поверхонь деталей, що працюють в важких умовах оточуючих середовищ і підлягають інтенсивному гідроабразивному зношенню, крім зміцнення поверхневих шарів, серед яких особливе місце займає хіміко-термічне оброблення, використовують інші методи: приварювання зносостійких пластин, напилювання і наплавлення твердими зносостійкими матеріалами, нанесення шлікерних покриттів, які є шкідливими для здоров'я людини і небезпечними для оточуючого середовища. Серед найбільш ефективних, енергоощадних і екологічно безпечних технологій нанесення захисних покриттів, особливе місце займає електроіскрове легування, яке в

комбінації з поверхневим пластичним деформування і нанесенням металопластичних матеріалів, армованих порошками твердих зносостійких матеріалів (карбід вольфраму і нітрид цирконію) може забезпечити захист деталей від гідроабразивного і інших видів зносу.

3. Проведеними дослідженнями доведено, що альтернативою технології захисту сталених і чавунних деталей машин від гідроабразивного і інших видів зношування, шляхом нанесення методом ЕІЛ захисних покриттів ЕІ складу 90%ВК6+10%1М, виготовленими методом порошкової металургії може бути більш технологічна, дешевша і ефективніша технологія, що полягає в використанні компактних ЕІ з застосуванням СТНС.

4. На підставі теоретичних досліджень розроблено систему спрямованого вибору екологічно безпечної технології виготовлення і ремонту відповідальних деталей машин, які працюють у важких умовах гідроабразивного зносу. При цьому розроблена формалізована методика визначення оптимального варіанта потрібної технології, а кожен її варіант реалізується можливими комбінаціями рішень мінімізованими з економічних і екологічних показників.

5. В результаті проведених досліджень запропонована нова технологія, яка забезпечує підвищення здатності деталей чинити опір зношуванню, гарантує надійність і довговічність їх роботи в агресивних середовищах, екологічну безпеку і скорочення витрат на їх виготовлення. Кращою стійкістю володіють зразки з сталі 12X18H10T, з покриттями: ЦЕІЛ → ЕІЛ А1 → ЕІЛ (90%ВК6+10%1М) → МПМ (80% ZrN), знос яких у порівнянні із зразками зі сталі 45 менший на 37,3%, на 96,7% менше зразків без покриття, на 38,7% менше в порівнянні з аналогом і, відповідно, на 6,5 і на 9,7%, менше покриттів, МПМ яких, армовані сумішшю (40%WC+40%ZrN) і 80%WC). Для високоміцного чавуну марки ВЧ60 кращі результати з гідроабразивної зносостійкості показали зразки з покриттям, сформованим в послідовності: ЕІЛ А1 → ЕІЛ (90%ВК6+10%1М) → МПМ (80% ZrN), знос яких на 97,1% менше зразків без покриття, на 44,1% менше в порівнянні з прототипом (зразками зі сталі 12X18H10T) і відповідно, на 5,9 і 14,7% менше сформованих в послідовності ЕІЛА1 → ЕІЛ

(90%ВК6+10%1М) → МПМ (40%WC+40%ZrN) і в послідовності ЕІЛАІ → ЕІЛ (90%ВК6+10%1М) → МПМ (80% WC).

6. Розроблені і впроваджені у виробництво технологічні рекомендації виготовлення й ремонту деталей машин, поверхні яких в процесі роботи підлягають гідроабразивному і другим видам зношування, економічними, енергоощадними і екологічно безпечними технологіями, захищеними двома патентами України із загальним економічним ефектом 405 тис. грн.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше встановлено функціональний взаємозв'язок між закономірностями технологічного процесу формоутворення поверхні деталі з заданими експлуатаційними властивостями і інтегральними показниками економічної ефективності та екологічної безпеки, що дозволило кількісно оцінити вплив кожної складової технологічного процесу ремонту на екологічну безпеку виробництва в цілому.

2. Вперше експериментальними дослідженнями встановлено кореляційний зв'язок між ваговим і лінійним зносом сталевих та чавунних зразків з електроіскровими покриттями та величиною енергії, витраченої на руйнування поверхневого шару, який в першому наближенні нагадує експоненціально зростаючу залежність. Отримано рівняння вагового та лінійного зносу захисних електроіскрових покриттів сталевих та чавунних зразків і запропонований алгоритм для визначення їх констант (максимального вагового зносу Δm_n , максимального лінійного зносу Δh_n і енергії активації процесу зносу E_A).

3. Вперше науково обґрунтовано та узгоджено параметри розробленої системи спрямованого вибору більш надійної і екологічно безпечної технології виготовлення і ремонту відповідальних деталей машин, які працюють у важких умовах гідроабразивного зносу.

4. Вперше на підставі встановлених кореляційних залежностей між енергією витраченою на руйнування поверхневого шару E_T та ваговим $\Delta m_{E3+ГЗ}$ та лінійним $\Delta h_{E3+ГЗ}$ зносом композиційних електроіскрових покриттів (КЕП) зразків, фізично обґрунтовано функціональні зв'язки між основними параметрами процесу зносу (рівняння зносу), що дозволяє по енергії, затраченій

на руйнування поверхневого шару, визначати лінійний та ваговий знос КЕП покриття, а також вирішувати зворотну задачу - знаходити величину енергії руйнування поверхневого шару, необхідної для здійснення зносу певної кількості речовини або отримання необхідного лінійного зносу.

5. Вперше для різних матеріалів зразків (сталь 45, сталь Р6М5 і високоміцний кулястий чавун ВЧ50) обґрунтовано розроблену методику визначення констант рівняння зносу: найбільшого вагового та лінійного зносу, відповідно $\Delta m_{E3+ГЗ \max}$ та $\Delta h_{E3+ГЗ \max}$, а також енергію активації процесу зношування E_A , які можуть бути критеріями вибору найбільш раціональної та екологічно безпечної технології виготовлення і ремонту відповідальних деталей машин, які працюють у важких умовах гідроабразивного зносу.

6. Вперше експериментальними дослідженнями доведена економічна, технологічна, експлуатаційна і екологічна доцільність нанесення на металеві поверхні композиційних ЕІП компактними електродами з використанням СТНС в порівнянні з ЕІ, виготовленими шляхом спікання ПМ.

7. Вперше експериментальними і порівняльними дослідженнями доведена перевага армування металополімерних матеріалів порошком нітриду цирконію при формуванні комбінованих зносостійких покриттів, нанесених в послідовності ЕІЛ Al $\rightarrow$ ЕІЛ (90%ВК6+ 10%1М) $\rightarrow$ МПМ (80% ZrN) на чавунні поверхні і з попередньою ЦЕІЛ на поверхні зі сталі для захисту від гідроабразивного зносу.

Практичне значення одержаних результатів полягає в розробці ряду технологічних рекомендацій нанесення захисних покриттів на деталі, працюючі в умовах гідроабразивного і ерозійного зносу, вживання яких допоможе підвищити їх зносостійкість і довговічність. Отриманні в роботі технологічні рішення, захищені 2 патентами і впроваджені на ПАТ «НВАТ ВНДІКОМПРЕСОРМАШ», АТ «СМНВО ІНЖІНІРИНГ» та ТОВ «ТРІЗ ЛТД», м. Суми з загальним очікуваним економічним ефектом 405000 (чотириста п'ять тисяч) гривен.

Основні результати дисертаційної роботи, їх узагальнення та викладені наукові положення та висновки, що становлять суть роботи, отримані та сформульовані автором самостійно.

Ключові слова: компресор, втулка, корпус компресора, гідроабразивний знос, абразивний знос, вал, знос, зносостійкість, зносостійкі покриття, електроіскрове легування, легуючі елементи, покриття, поверхневий шар, шорсткість, мікротвердість, поверхнєве пластичне деформування.

ABSTRACT

Maifat M.M. Technological provision of protection of parts of machines operating in conditions of hydroabrasive wear by highly effective complementary combined methods. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 13 - Mechanical Engineering in the specialty 133 - Industrial Mechanical Engineering. – Sumy National Agrarian University, Sumy, 2024.

The dissertation is devoted to the solution of an actual scientific and technical problem in the field of mechanical engineering: the development of innovative, short-term, energy-saving and environmentally safe technologies for surface strengthening and restoration of machine parts operating under conditions of intensive hydroabrasive wear. The solution to this problem will help increase the reliability and durability of machines by increasing the service life of their important parts, and reduce energy costs, which is very important for modern Ukraine.

The object of the study is the technological process of forming functional coatings on the surface of machine parts and their elements working under conditions of hydroabrasive wear.

The subject of the study is the regularities of the technological process of forming a surface layer with specified operational properties that ensure the necessary quality (durability, environmental safety, wear resistance, workability) of machine parts and their elements working under hydroabrasive wear conditions.

The purpose and tasks of research

The **purpose** of the work is to increase the wear resistance of the surface layers of machine parts and their elements working under conditions of intensive hydroabrasive wear by applying environmentally safe composite wear-resistant coatings on their surfaces, formed by the method of electrospark alloying, followed by processing with metal-polymer materials reinforced with tungsten carbide, zirconium nitride powders, or their mixture.

To fulfill the set goal, the following **tasks** must be solved:

1. To conduct an analysis of the causes of wear of machine parts, the surfaces of which in the process of work come into contact with an abrasive found in liquid flows and other harsh conditions of the surrounding environment.

2. To conduct an analysis of the existing technological methods of protecting steel and cast-iron machine parts from hydroabrasive and other types of wear and tear and to choose the most rational ones.

3. To evaluate the possibility of using the EIL method with the use of special technological saturating media (STNS) to protect steel and cast iron machine parts from hydroabrasive and other types of wear.

4. To develop a system of targeted selection of technology for protecting machine parts from hydroabrasive and other types of wear.

5. Conduct comparative tests of steel and cast iron samples with different protective coatings for hydroabrasive wear.

6. Develop technological recommendations for ecologically and technogenically safe production and repair of machine parts, the surfaces of which are subject to hydroabrasive and other types of wear during operation, and implement the results of research into production.

The **introduction** substantiates the choice of the dissertation topic and scientific tasks, formulates the purpose and tasks of the research, defines the scientific novelty and practical significance of the obtained results, as well as provides information about the approval, structure and scope of the work.

In the **first chapter**, it was determined that among all the machines and devices operating in various branches of industry of Ukraine and other economies, a very large number are subject to gas abrasive wear (GA). These are, first of all, hydraulic machines (GM), among which the most common are pumps and hydraulic motors, as well as centrifuges for wastewater treatment, separators, fittings, and so on.

Also, the literature and patent analysis established that the manufacture and especially the restoration of parts takes place, as a rule, by environmentally hazardous technologies: welding, surfacing, spraying, etc. All this made it possible to formulate the goal and tasks for further research.

In the **second chapter**, a systematic approach to the selection of technologies

for controlling the quality parameters of the surfaces of machine parts working in hazardous conditions is improved. Thanks to theoretical studies, a formalized method of determining the optimal variant of the technology of manufacturing and repairing machine parts has been developed. At the same time, each option is implemented by possible combinations of solutions minimized from economic and environmental indicators.

As a result of the analysis of the factors that affect the wear of electrospark coatings (EIP) of the surfaces of the machine parts under investigation (the rotor of the screw compressor (SC), the protective sleeve (SC) of the oil seal and the compressor housing (CC)) it was established that with an increase in the energy spent on destruction of the surface layer of their working surfaces against the abrasive particles in the liquid flow, the wear efficiency increases, which is associated with the distribution of the hardness of the coating along the depth. With complete wear of protective PPE, the intensity of wear increases sharply, which affects the reduction of equipment efficiency. Experimental studies have established that the correlation dependences of the weight, $\Delta m_{H3+\Gamma3}$ and linear $\Delta h_{H3+\Gamma3}$ wear of the coatings of the investigated machine parts on the amount of energy spent on the destruction of the ET surface layer resemble exponential dependencies in the first approximation.

Equations of weight and linear wear of protective electrospark coatings of critical parts of machines are obtained and the proposed algorithm for determining their constants (maximum weight wear $\Delta m_{H(H3+\Gamma3)}$ and maximum linear wear $\Delta h_{H(H3+\Gamma3)}$ and activation energy of the E_A wear process). A methodology is proposed that allows engineering and technical workers of repair services to determine the wear time of the reinforced layer or applied coating on the surface of the machine parts under investigation and to stop the equipment for repair work.

In the **third section**, the parameters of the quality of applied protective coatings were studied on samples made of steel 45, P6M5 and high-strength ductile iron of the B450 brand. Medium-carbon unalloyed steel 45 was used for research, as it is the most common for the manufacture of machine parts. It was used in an improved condition with a base hardness of 280HB and a sorbite structure. At the same time, the aim was to maximally exclude the influence of alloying of the substrate (cathode) on the

structure formation of the layer and to study the principle of formation of the structure of the surface layer on metal substrates with the transition from an unalloyed iron base (steel 45) to multi-component complex alloyed high-speed cutting steel P6M5 where the sum of alloying elements reaches 16 - 18% P6M5 steel is mainly used for the manufacture of metal cutting tools, which are also subject to hydroabrasive wear during operation. The hardness of P6M5 steel samples after the final heat treatment was up to 64 HRC. In addition to steel, for research as cathode material, samples of high-strength spheroidal cast iron of the BЧ50 and BЧ60 brands were used, the main mechanical characteristics of which are: $\sigma_{0.2}=370\ldots500$ MPa, $\delta=2\ldots7\%$, hardness according to the Brinell scale 153...360 HB.

When mass transfer was investigated, samples made of high-strength BЧ50 cast iron with a size of 10×10×8 mm were used. The anode was compact EI made by the method of powder metallurgy (PM) with the composition: 90% VK6 + 10% 1M) and 1M - 70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% B. Also used were compact EI made of hard alloy VK6 and nichrome wire of the X20H80 brand, when using which STNS was previously applied to the samples.

To study the structure and measure the microhardness of the surface layer, grinds of samples of steel 45 and P6M5 and cast iron BЧ50 in size 10×10×8 mm were used. EIL of samples occurred with discharge energy, $W_p=0.52; 1.3$ and 2.6 J and with productivity, $Q=1.0; 1.5$ and 2.0 cm²/min on the installation with EIL "Elitron-52A".

Nichrome wire X20H80 Ø3 mm and 2×3×30 mm VK6 hard alloy plates were used as EI. During EIL, STNS was previously applied to the samples with electrodes made of X20H80 wire, according to 2 options: 1st: 5% Si+ 5% B+90% petroleum jelly; 2nd: 0.5% Si+0.5% B+59% VK6+40% petroleum jelly. In case of EIL EI made of VK6 hard alloy, STNS of the following composition was applied to the samples: 0.5% Si+0.5% B+2% Cr+7% Ni+90% petroleum jelly.

After EIL, non-abrasive ultrasonic finishing (BUFO) was used to improve the quality parameters of the surface layers (reduction of coating roughness, increase of continuity and fatigue strength, change of residual stresses from tensile to compressive).

Metallographic and durometric studies, determination of roughness, formed

surface layers, micro-X-ray spectral analysis, as well as studies of the influence of the EIL method on the mechanical properties of the part were carried out according to standard methods and on the appropriate equipment.

Metallographic studies have established that the surface layers of steel 45 and P6M5 after applying wear-resistant coatings have a structure consisting of three areas: a "white" layer on top, a transition zone and the base metal below. When the discharge energy increases, the thickness of the "white" layer and the transition zone, as well as microhardness and surface roughness, increase, but the integrity decreases. The highest microhardness of 12,800 and 14,600 MPa belongs to the coatings formed, respectively, on steel 45 and P6M5 at EIL by compact EI from hard alloy VK6 and STNS composition 0.5%Si+0.5%B+2%Cr+7% Ni+90% vaseline.

When applying coatings to BЧ50 cast iron, both compact EI, composed of 90% BK6 + 10% 1M and 1M, and EI with VK6 hard alloy and X20H80 nichrome wire using STNS, the structure of the surface layer consists of three sections "white" and transition layers with a thickness of 15-75 and 10-20 μm , respectively, and the base metal. The highest microhardness, 13,260 and 12,800 MPa, respectively, was obtained when using compact EI made of hard alloy VK6 and nichrome wire X20N80 and using STNS, and the thickness of their layer of increased hardness reaches 50 and 90 microns, respectively.

As a result of the study of mass transfer during EIL of samples made of BЧ50 cast iron, it was established: with increasing alloying time, the amount of transferred material increases, from the anode, (Δm_a) to the cathode, (Δm_k), and the roughness and integrity of the coating practically does not change; the largest amount of material is transferred from the beginning of the EIL process, then the mass transfer process gradually decreases, stops completely and can be changed by the destruction of the applied layer, i.e. Δm_k becomes negative ($-\Delta m_k$); with an increase in W_p , the mass transfer process increases, but the process of destruction of the applied layer of the coating begins earlier, while the roughness of the coating increases and its integrity decreases; with constant discharge energy at equal intervals of time, the amount of lost weight (erosion) of the anode, Δm_a , almost does not change.

X-ray microspectral analysis established that the surface of the coatings consists

of their chemical elements and a small amount of iron, which is part of the samples. The number of alloying elements in the coating gradually decreases as it deepens and at a depth of ~ 50 microns for coatings with a composition of 90% VK6 + 10% 1M and hard alloy VK6 and STNS elements and, respectively, 60 and 70 microns for coatings with a composition of 1M and nichrome wire X20H80 and STNS elements, completely disappears, and the amount of iron increases.

In the **fourth chapter**, comparative tests of steel 45 and P6M5 samples, strengthened by compact EI manufactured by the PM method, composed of 90% VK6 + 10% 1M and 1M, as well as compact EI made of hard alloy VK6 and nichrome wire X20N80, using STNS, were conducted against hydroabrasive wear. As a result, it was established that samples with a coating applied by the EIL EI method from VK6 hard alloy using STNS composition $0.5\%\text{Si}+0.5\%\text{B}+2\%\text{Cr}+7\%\text{Ni}+90\%$ petroleum jelly have better durability, the wear of which on 122 and 43% less than in samples without coating, respectively, for steel 45 and P6M5. The analysis of the effectiveness of the wear process showed that with increasing time, the wear, at equal time intervals, gradually increases.

To study the influence of processing parameters by the EIL and BUFO method on the mechanical properties of parts, samples were strengthened by the EIL method on the Elytron-52A model installation in two stages: 1st at $W_p=2.6$ J and $Q=2.0$ cm²/min. ; 2nd at $W_p=0.13$ J and $Q=0.5$ cm²/min. At EIL in one etal EI, produced by the PM method, of parts made of steel 45 and steel P6M5 is accompanied by a decrease in the strength limit (σ_B) and yield limit (σ_T), respectively, by 11.8 and 7.7% and 11.5 and 7.1%, and the relative elongation (δ) and relative narrowing (ψ) increases by 12.5 and 2.5% and 8.0 and 6.9%, respectively. The roughness of the surface layer increases from $R_a=0.5$ to $R_a=5.3-6.5$ μm , and the integrity of the coating is 70-80%. When coatings formed in two stages are applied, the surface roughness increases from $R_a=0.5$ to $R_a=1.9-2.0$ μm , and the continuity of the coating increases to 90% and, as a result, σ_B and σ_T decreases, for steel 45 and P6M5 steel, by 5.1 and 4.0 and 2.7 and 2.4%, respectively, and δ and ψ increases by 9.4 and 1.3% and 5.8 and 5.0%, respectively. When applying coatings formed in two stages and carrying out BUFO, the surface roughness becomes even smaller $R_a=1.9-2.0$ μm , the integrity of the coating

increases to 95%. As a result, σ_B and σ_T increase, for steel 45 and P6M5 steel, by 2.8 and 3.1 and 2.0 and 1.8%, respectively, and δ and ψ decrease by 1.3 and 0.9%, respectively, and 0.8 and 0.7%.

When applying coatings using EI made of X20H80 wire and hard alloy VK6 and STNS, both in one stage and in two stages, the decrease in σ_B and σ_T is much smaller, and is, respectively, 8.2 and 4.9 and 2.7 and 2.4% and 8.8 and 4.4 and 4.5 and 1.8%, and δ and ψ also grow less, respectively by 11.9 and 1.7 and 9.4 and 1.0% and 8,0 and 6.9 and 5.6 and 4.8%. With further BUFO growth, σ_B and σ_T increase, for steel 45 and P6M5 steel, by 4.9 and 4.6 and 3.5 and 2.7%, respectively, and δ and ψ decrease by 1.7 and 1.3, respectively and 2.0 and 1.7%. The surface roughness decreases to $R_a=1.1 \mu\text{m}$, and the integrity is 100%. For practical implementation, wear-resistant coatings formed according to the new technology are proposed, using EI from X20H80 wire and VK6 hard alloy and STNS in two stages with the following BUFO, the growth of σ_B and σ_T which increase, for steel 45 and steel P6M5, respectively by 4.9 and 4.6 and 3.5 and 2.7%, and δ and ψ decrease by 1.7 and 1.3 and 2.0 and 1.7%, respectively. At the same time, the surface roughness is $R_a=1.1 \mu\text{m}$, and the continuity is 100%.

Electrospark doping of EI composition (90% VK6 + 10% 1M) and 1M, produced by the PM method, of samples with HF60 at $W_p=0.55 \text{ J}$ and $Q=0.67 \text{ cm}^2/\text{min}$ is accompanied by a decrease in σ_t and σ_v , respectively, by 32.0 and 32.78% and 34.0 and 28.7%, while δ increases by 5.71 and 5.43%. The roughness of the surface layer increases from $R_a=0.5$ to 3.2 and 3.3 μm , and the integrity of the coating (S) is 60 and 80%, respectively. After BUFO processing, σ_t and σ_v increase to 325 and 324.1 and 512 and 526 MPa, respectively, and δ decreases to 1.16 and 2.14%, respectively. The surface roughness decreases to $R_a=0.8$ and 0.7 μm , and S increases to 70 and 90%. In the EIL of samples from high-strength cast iron BЧ50 EI from wire X20H80 and VK6 hard alloy and using STNS, the decrease in σ_t and σ_B is less, and is 26.3 and 21.87 and 33.16 and 33.58%, respectively, and δ as well decreases and amounts to 2.86 and 3.57%, respectively. With further BUFO growth, σ_t and σ_B increase to 341.1 and 335.4 and 538.2 and 532.1 MPa, respectively, and δ decreases by 4.0 and 3.0%, respectively. The roughness of the coating decreases to $R_a=0.8$ and 0.7 μm , and S is 100 and 95%, respectively.

When increasing W_p from 0.55 to 1.3 and 3.4 J and using compact EI composition (90%BK6+10%1M) and 1M, made by the PM method and EI from VK6 hard alloy and X20H80 nichrome wire using STNS σ_t decreases at $W_p=1.3$ J to: 211.3; 225.7 MPa, and at $W_p=3.4$ J to 205.3 and 211.4 MPa, σ_v at $W_p=1.3$ J to 375.3 and 349.2, and at $W_p=3.4$ J to 321.2 and 325.2 MPa, δ , at the same time, increases, respectively: 7.15 and 7.17 and 7.20 and 7.18%. The roughness of the coating increases at $W_p=1.3$ J to $R_a=3.7$; 3.9; 4.2 and 4.3 μm , and at $W_p=3.4$ J to $R_a=6.0$; 6.3; 6.7 and 7.5 μm . Continuity decreases at $W_p=1.3$ J to $S=55$; 70; 85 and 80%, and when $W_p=3.4$ J, up to $S=45$; 50; 70 and 65%. After the next BUFO, σ_t increases at $W_p=1.3$ J to: 321; 321.5; 325.1 and 324.4 MPa, and at $W_p=3.4$ J to 320.5; 320.9; 323.1 and 322.8 MPa, σ_B increases at $W_p=1.3$ J to 506 and 507 MPa, and at $W_p=3.4$ J to 502.1; 503.6; 505.8 and 504.9 MPa; δ , at the same time, decreases, respectively: 6.89 and 6.81 and 6.75 and 6.59%. The roughness of the coating decreases with $W_p=1.3$ J to $R_a=0.8$; 0.8; 0.9 and 0.9 μm , and when $W_p=3.4$ J to $R_a=1.2$; 1.3; 1.4 and 1.5 μm , and S increases to 60, 75, 85, and 80 and 55, 65, 80, and 75%, respectively.

As a result of the conducted research, a new technology was proposed, which ensures an increase in the ability of parts to resist wear, guarantees the reliability and durability of their work in aggressive environments, environmental safety, and a reduction in the cost of their manufacture. Samples made of 12X18N10T steel with coatings: CEIL $\rightarrow$ EIL Al $\rightarrow$ EIL (90%VK6+ 10%1M) $\rightarrow$ MPM (80% ZrN) have the best resistance, the wear of which is 37.3% less compared to samples made of steel 45, on 96.7% less samples without coating, 38.7% less compared to the analogue and, respectively, 6.5 and 9.7% less coatings, MPMs of which reinforced with a mixture (40%WC+40%ZrN) and 80% WC). For high-strength BЧ60 cast iron, the best results in hydroabrasive wear resistance were shown by samples with a coating formed in the sequence: EIL Al $\rightarrow$ EIL (90%BK6+ 10%1M) $\rightarrow$ MPM (80% ZrN), the wear of which is 97.1% less than samples without coating, by 44.1% less compared to the prototype (samples of 12X18N10T steel) and, accordingly, by 5.9 and 14.7% less formed in the sequence EIL Al $\rightarrow$ EIL (90%VK6+10%1M) $\rightarrow$ MPM (40% WC+40%ZrN) and in the sequence EIL Al $\rightarrow$ EIL (90%BK6+10%1M) $\rightarrow$ MPM (80% WC).

Obtaining in actual work technological solutions, which are used by ecologically

and technologically safe methods, implemented at PJSC "NVAT VNDIKOMPRESSORMASH", JSC "SMNVO ENGINEERING" and LLC "TRIZ LTD", Sumy, with a total expected economic effect of 405,000 (four hundred and five thousand) hryvnia.

In accordance with the set goal and tasks, the following results were obtained in the work:

1. As a result of the analysis of the operation of machines and devices in the gas and oil, mining, metallurgical, chemical, agricultural, transport and other industries, it was established that most of them work in difficult environmental conditions and are subject to intensive wear due to contact with an abrasive that is in fluid streams and, in addition to hydroabrasive wear, is also subject to other types of wear: corrosion, erosion, cavitation, biological damage, etc.

2. Today, other methods are used to protect the surfaces of parts that work in harsh environmental conditions and are subject to intensive hydroabrasive wear, in addition to strengthening the surface layers, among which chemical and thermal treatment occupies a special place: welding of wear-resistant plates, filing and surfacing with hard wear-resistant materials, applying slicker coatings that are harmful to human health and dangerous for the environment. Among the most effective, energy-saving and environmentally friendly technologies for applying protective coatings, a special place is occupied by electrospark alloying, which, in combination with surface plastic deformation and the application of metal-plastic materials reinforced with powders of hard wear-resistant materials (tungsten carbide and zirconium nitride), can provide protection of parts from hydroabrasive and other types of wear and tear.

3. The conducted studies proved that an alternative to the technology of protecting steel and cast-iron parts of machines from hydroabrasive and other types of wear, by applying the EIL method of EI protective coatings of the composition 90%BK6+10%1M, produced by the method of powder metallurgy, can be more technological, cheaper and more effective technology, which consists in the use of compact EI with the use of STNS.

4. On the basis of theoretical studies, a system of targeted selection of environmentally safe manufacturing and repair technology of important parts of

machines that work in difficult conditions of hydroabrasive wear has been developed. At the same time, a formalized method of determining the optimal variant of the required technology has been developed, and each variant is implemented by possible combinations of solutions minimized from economic and environmental indicators.

5. As a result of the conducted research, a new technology was proposed, which ensures an increase in the ability of parts to resist wear and tear, guarantees the reliability and durability of their work in aggressive environments, environmental safety and reduction of costs for their manufacture. Samples made of 12X18N10T steel with coatings: CEIL $\rightarrow$ EIL Al $\rightarrow$ EIL (90%BK6+ 10%1M) $\rightarrow$ MPM (80% ZrN) have the best resistance, the wear of which is 37.3% less compared to samples made of steel 45, on 96.7% less samples without coating, 38.7% less compared to the analogue and, respectively, 6.5 and 9.7% less coatings, MPMs of which reinforced with a mixture (40%WC+40%ZrN) and 80% WC). For high-strength BЧ60 cast iron, the best results in terms of hydroabrasive wear resistance were shown by samples with a coating formed in the sequence: EIL Al $\rightarrow$ EIL (90%BK6+ 10%1M) $\rightarrow$ MPM (80% ZrN), the wear of which is 97.1% less than samples without coating , by 44.1% less compared to the prototype (samples of 12X18N10T steel) and, accordingly, by 5.9 and 14.7% less formed in the sequence EILAl $\rightarrow$ EIL (90%VK6+10%1M) $\rightarrow$ MPM (40% WC+40%ZrN) and in the sequence EILAl $\rightarrow$ EIL (90%BK6+10%1M) $\rightarrow$ MPM (80% WC).

6. Technological recommendations for the manufacture and repair of machine parts, the surfaces of which are subject to hydroabrasive and other types of wear during operation, were developed and implemented in production, using economical, energy-saving and ecologically safe technologies, protected by two patents of Ukraine with a total economic effect of 405 thousand UAH.

Scientific novelty of the obtained results:

1. For the first time, a functional relationship was established between the laws of the technological process of shaping the surface of the part with given operational properties and integral indicators of economic efficiency and environmental safety, which made it possible to quantitatively assess the impact of each component of the

repair technological process on the environmental safety of production as a whole.

2. For the first time, experimental studies established a correlation between weight and linear wear of steel and cast iron samples with electrospark coatings and the amount of energy spent on the destruction of the surface layer, which in the first approximation resembles an exponentially growing dependence. Equations of weight and linear wear of protective electrospark coatings of steel and cast iron samples were obtained and an algorithm was proposed for determining their constants (maximum weight wear Δm_H , maximum linear wear Δh_n and activation energy of the wear process EA).

3. For the first time, the parameters of the developed system for the targeted selection of a more reliable and environmentally safe manufacturing and repair technology for critical parts of machines that work in severe hydroabrasive wear conditions have been scientifically substantiated and agreed upon for the first time.

4. For the first time, on the basis of the established correlation dependences between the energy spent on the destruction of the surface layer of ET and weight $\Delta m_{E3+\Gamma3}$ and linear $\Delta h_{E3+\Gamma3}$ wear of composite electrospark coatings (ECS) of samples, the functional relationships between the main parameters of the wear process were physically substantiated (wear equation), which allows you to determine the linear and weight wear of the KEP coating based on the energy spent on the destruction of the surface layer, as well as to solve the inverse problem - to find the amount of energy of the destruction of the surface layer, which is necessary to carry out the wear of a certain amount of substance or obtain the necessary linear wear.

5. For the first time, for different sample materials (steel 45, steel P6M5 and high-strength nodular cast iron BЧ50), the developed methodology for determining the constants of the wear equation: the largest weight and linear wear, respectively $\Delta m_{E3+\Gamma3 \max}$ and $\Delta h_{E3+\Gamma3 \max}$), as well as the activation energy of the EA wear process, which can be the criteria for choosing the most rational and environmentally safe manufacturing and repair technology of important parts of machines that work in difficult conditions of hydroabrasive wear.

6. For the first time, experimental studies proved the economic, technological, operational and environmental feasibility of applying composite EIPs to metal surfaces

with compact electrodes using STNS in comparison with EIPs made by PM sintering.

7. For the first time, experimental and comparative studies proved the advantage of reinforcing metal-polymer materials with zirconium nitride powder in the formation of combined wear-resistant coatings applied in the sequence EIL Al $\rightarrow$ EIL (90%BK6+10%1M) $\rightarrow$ MPM (80% ZrN) on a cast iron surface and with a previous CEIL on a steel surface to protect against water-abrasive wear.

The practical significance of the obtained results lies in the development of a number of technological recommendations for the application of protective coatings on parts operating in conditions of hydroabrasive and erosive wear, the use of which will help to increase their wear resistance and durability. Technological solutions obtained in the work, protected by 2 patents and implemented at PJSC "NVAT VNDIKOMPRESSORMASH", JSC "SMNVO ENGINEERING" and LLC "TRIZ LTD", Sumy with a total expected economic effect of 405,000 (four hundred and five thousand) hryvnias.

The main results of the dissertation work, their summaries and the stated scientific propositions and conclusions, which constitute the essence of the work, were obtained and formulated by the author independently.

Key words: *compressor, sleeve, compressor housing, hydroabrasive wear, abrasive wear, shaft, wear, wear resistance, wear-resistant coatings, electrospark alloying, alloying elements, coating, surface layer, roughness, microhardness, surface plastic deformation.*

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, V. I. Melnyk, N. V. Tarel'nyk, V. M. Zubko, V. M. Vlasovets, Ie. V. Konoplianchenko, S. G. Bondarev, O. V. Radionov, M. M. Mayfat, V. O. Okhrimenko, and A. V. Tkachenko, 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., 45, No. 5: 663—686 (2023) <https://doi.org/10.15407/mfint.45.05.0663> (in Ukrainian)

Здобувач запропонував при нанесенні покриттів використовувати спеціальні технологічні середовища

2. V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, N. V. Tarel'nyk, Ie. V. Konoplianchenko, S. G. Bondarev, O. V. Radionov, M. M. Mayfat, A. V. Okhrimenko, M. Yu. Dumanchuk, and K. G. Sirovitskiy, 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. 2. Wear Resistance, Topographic and Mechanical Properties, Metallofiz. Noveishie Tekhnol., 45, No. 6: 773—794 (2023) <https://doi.org/10.15407/mfint.45.06.0773> (in Ukrainian)

Здобувачем розроблена методика порівняльних випробувань на зносостійкість зразків з різним покриттям.

3. O. P. Gaponova, V. B. Tarel'nyk, V. S. Martsynkovskyy, Ie. V. Konoplianchenko, V. I. Melnyk, V. M. Vlasovets, G. V. Kirik, N. V. Tarel'nyk, M. O. Mikulina, A. A. Kutakh, A. D. Polyvanyi, M. M. Mayfat, and A. N. Kalnaguz, Combined Electrospark Running-in Coatings of Bronze Parts. Part 3. Tribological Properties, Metallofiz. Noveishie Tekhnol., 43, No. 10: 1325—1334 (2021) (in Ukrainian)

Здобувачем розроблена методика трибологічних досліджень зразків з різним покриттям.

4. Tarelnyk, N. V., Gaponova, O. P., Maifat M. M., Vasylenko, M. Y., Heiko, T. O. (2023). Problems and prospects for solving the issues of increasing the durability of machine parts operating under conditions of hydroabrasive wear // Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes, (4 (54), 47-54. <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.4.8>

Здобувачем проведено аналіз літературних джерел, присвячених підвищенню довговічності деталей машин, що працюють в умовах гідроабразивного зношування

5. MaifatM. M., Tarelnyk, N. V., Gaponova, O. P., Radionov, O. V., & Tarelnyk, V. B. (2023). Improvement of the technology of processing the friction pair «bearing insert – shaft neck» // Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes, (1 (51), 53-58. <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.1.9>

Здобувачем розроблена методика обробки пари тертя «вкладиш підшипника – шийка вала»

6. Тарельник Н.В., Майфат М.М. Захист деталей з високоміцного чавуну від гідроабразивного зносу комбінованими екологічно безпечними методами. "Наукові нотатки" Луцького національного технічного університету, випуск 76, 2023. С 66-71.

Здобувачем проведені порівняльні випробування на зносостійкість зразків з різним покриттям.

7. Тарельник Н.В., Майфат М.М. Новий спосіб захисту сталевих деталей від гідроабразивного зносу екологічно безпечними технологічними методами. Вісник Херсонського національного технічного університету, № 4/87, 2023. С 165-172.

Здобувачем проведені порівняльні випробування на зносостійкість зразків з різним покриттям.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Тарельник В.Б., Майфат М.М., Доценко А.О. Удосконалення методу системного підходу вибору технологій потрібної якості поверхонь шарів деталей

машин, що працюють в умовах гідроабразивного зношування// XX-й Міжнародний форум молоді "Молодь і індустрія 4.0 В XXI столітті". Збірка матеріалів форуму. – Харків: ДБТУ. 2024. С. 132

Здобувач запропонував в дослідженнях використовувати метод системного підходу при виборі технології потрібної якості поверхні деталі.

9. Коноплянченко Є.В., Майфат М.М. Прогресивна технологія формування зносостійких покриттів на складнопрофільних поверхнях сталевих деталей // XX-й Міжнародний форум молоді "Молодь і індустрія 4.0 В XXI столітті". Збірка матеріалів форуму. – Харків: ДБТУ. 2024. С. 133

Здобувачем представлена методика формування зносостійких покриттів на складнопрофільних поверхнях сталевих деталей.

10. Лебець А.В., Майфат М.М. Дослідження технології електроконтактного зміцнення для підвищення зносостійкості робочих поверхонь деталей машин // Технології XXI сторіччя: Збірник тез за матеріалами 26-ої міжнародної науково-практичної конференції (7-9 грудня 2020 р.). Ч.1. – Суми: СНАУ, 2020 – С. 134-135

Здобувачем обґрунтовано використання технології електроконтактного зміцнення робочих поверхонь деталей машин.

11. Tarelnyk V.B., Konoplianchenko Ie.V., Mayfat M.M., Kozynskyi A.G. Technological support of bronze parts working surfaces tribological properties // Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво : матеріали XX Міжнародної науково-технічної конференції (м. Суми, 29 вересня – 1 жовтня 2021 року) / редкол.: В. О. Залога, В. О. Іванов. – Суми : Сумський державний університет, 2021. – С. 19-20

Здобувачем запропоновано методику підвищення трибологічних властивостей робочих поверхонь бронзових деталей.

12. Пермяков О.А., Тарельник В.Б., Тарельник Н.В., Майфат М.М. Підвищення довговічності деталей машин, працюючих в умовах гідроабразивного зношування. XII Міжнародної науково-технічної конференції "Прогресивні технології в машинобудуванні", 5-9 лютого 2024 р. Івано-Франківськ, Яремче, С.133-134.

Здобувачем проведений аналіз літературних джерел, присвячених підвищенню довговічності деталей машин.

Список патентів:

13. Пат. на корисну модель 155801 Україна, В23Н 1/06, (2006.01) Спосіб підвищення зносостійкості сталевих виробів / О.П. Гапонова, UA; Н.В. Тарельник, UA; В.Б. Тарельник, UA; Томаш Мосціцький, PL; В.О. Охріменко UA О.І. Жиленко, UA; М.М. Майфат, UA; и 2023 04550 заявл. 26.09.2023; опубл. 10.04.2024, Бюл. № 5.

Здобувачем представлені результати порівняльних випробувань на зносостійкість зразків з різним покриттям.

14. Пат. на корисну модель 155798 Україна, МПК (2024.01) В23Н 9/00 В23Н 5/00; Спосіб захисту чавунних деталей від гідроабразивного зносу / В.Б. Тарельник, UA; О.П. Гапонова, UA; Н.В. Тарельник, UA; М.О. Мікуліна UA; О.М. Лавренко UA; М.М. Майфат, UA; В.О. Охріменко UA О.І. Жиленко, UA; М.М. Майфат, UA; А.О. Білий, UA; и 2023 04255; заявл. 08.09.2023; опубл. 10.04.2024, Бюл. № 15.

Здобувачем проведені порівняльні випробування на зносостійкість зразків з різним покриттям.

15. Пат. на корисну модель 155984 Україна, МПК (2024.01) В23Н 9/00 В23Н 5/00; Спосіб захисту сталевих деталей від гідроабразивного зносу / В.Б. Тарельник, UA; О.П. Гапонова, UA; Н.В. Тарельник, UA; М.О. Мікуліна UA; О.М. Лавренко UA; М.М. Майфат, UA; В.О. Охріменко UA О.І. Жиленко, UA; Доценко А.О., UA; А.О. Білий, UA; и 2023 04251; заявл. 08.09.2023; опубл. 24.04.2024, Бюл. № 17.

Здобувачем проведені порівняльні випробування на зносостійкість зразків з різним покриттям.

ВСТУП.....	33
РОЗДІЛ 1 ПРОБЛЕМИ ЗАХИСТУ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, ВІД ГІДРОАБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ.....	39
1.1. Загальні відомості	39
1.2. Умови експлуатації і види зношування деталей.....	45
1.3 Технологічні методи захисту деталей від зношування	55
1.4. Висновки:	63
1.5. Мета роботи і задачі дослідження.....	64
РОЗДІЛ 2 СПРЯМОВАНИЙ ВИБІР ТЕХНОЛОГІЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НЕОБХІДНОЇ ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, ПРАЦЮЮЧИХ В УМОВАХ ГІДРОАБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ.....	66
2.1. Системний підхід до вибору технологій управління параметрами якості поверхневих шарів деталей машин, що працюють в умовах ГЗ	66
2.2. Система управління параметрами якості поверхонь деталей, працюючих в умовах ГЗ і ЕЗ.....	71
2.3 Цілеспрямоване обрання доцільної технології безпеки поверхонь деталей, працюючих в умовах гідроабразивного та ерозійного зношування	76
2.4 Висновки по розділу 2	87
РОЗДІЛ 3 ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, ПРАЦЮЮЧИХ В УМОВАХ ГІДРОАБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ.....	88
3.1. Особливості структурного стану поверхонь сталейних деталей з зносостійкими покриттями складу 1М і 90% ВК6+10%1М, нанесеними методом ЕІЛ з використанням СТНС	88
3.2. Особливості структурного стану поверхонь чавунних деталей з зносостійкими покриттями складу 1М і 90% ВК6+10%1М, сформованими ЕІ, виготовленими ПМ і ЕІЛ з використанням СТНС.....	102
3.3. Висновки:	122

РОЗДІЛ 4 ВЛАСТИВОСТІ ЗМІЦНЕНИХ ДЕТАЛЕЙ ЗІ СТАЛІ ТА ЧАВУНУ. ПРОМИСЛОВЕ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ	124
4.1. Оцінка впливу покриттів складу 90% ВК6+10%1М і 1М, сформованих на сталевих поверхнях, на топографічні та механічні властивості деталей.....	124
4.2. Новий спосіб захисту сталевих деталей від гідроабразивного зносу екологічно безпечними технологічними методами.....	143
4.3. Новий спосіб захисту чавунних деталей від гідроабразивного зносу екологічно безпечними технологічними методами.....	150
4.4. Розрахунок економічного ефекту розроблених технологічних рішень для впровадження в виробництво.....	153
4.5. Технологічні рекомендації застосування технології виготовлення і ремонту деталей машин, працюючих в умовах гідроабразивного зносу.....	158
4.6. Висновки:	161
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	165
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	167
ДОДАТКИ.....	185
ДОДАТОК А СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	186
ДОДАТОК Б ДОКУМЕНТИ ПРО ОХОРОНУ ПРАВ НА ВИНАХОДИ ТА КОРИСНІ МОДЕЛІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ	189
ДОДАТОК В АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ.....	196

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження

Збільшення терміну служби деталей машин, що працюють в умовах абразивного, ерозійного та корозійного зносу, є найбільш актуальною проблемою в Україні.

У світовій практиці вирішення проблем, пов'язаних з абразивно-корозійним зносом, де сільськогосподарська, нафтогазова, гірничодобувна, хімічна, промисловість тощо, роблять значні внески у ВВП, стає надзвичайно актуальною.

Кілька тисяч резервуарів, металевих будов і транспортних конструкцій з низьковуглецевих сталей, терміново потребують захисту від корозії та зносу.

Незважаючи на те, що леговані сталі та алюмінієві сплави широко використовуються в аерокосмічній та автомобільній промисловості, вони чутливі до атмосферної корозії і зношуються під час тривалої служби при важких умови експлуатації.

Захисні покриття використовують для захисту деталей схильних до корозії і різних форм зносу. Вони використовуються в нафтогазовій, нафтохімічній, морській, медичній, оборонній, енергетичній, металообробній та цементній промисловості.

У зв'язку з цим перспективним є використання нових матеріалів на основі полімерів, які характеризуються покращеними антикорозійними властивостями та зносостійкістю.

Поліпшення експлуатаційних характеристик технологічного обладнання, яке використовується в різних галузях промисловості, можливо шляхом застосування комбінованого використання металевих покриттів з металополімерними матеріалами. При цьому введення добавок в металополімерні матеріали у вигляді твердих корозійно і зносостійких порошків (твердих сплавів, карбіду і нітриду металів тощо) покращує технологічні властивості покриття, а також істотно впливає на фізико-механічні властивості, антикорозійні властивості та зносостійкість обладнання.

Враховуючи, що одним з найбільш перспективним методом формування захисних покриттів деталей машин від гідроабразивного ерозійного та корозійного виду зносу може бути ЕІЛ, то поєднання його з металополімерними матеріалами, армованими твердими і зносостійкими порошками може бути альтернативою і значно покращити існуючі на сьогодні технології захисту поверхонь деталей від зносу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертація виконана на кафедрі технічного сервісу та галузевого машинобудування Сумського національного аграрного університету (СНАУ) згідно з планом держбюджетної науково-дослідної роботи Міністерства освіти і науки України «Дослідження ресурсозберігаючих технологій формування функціональних покриттів робочих поверхонь деталей машин» (НДР № 0118U100099) та «Наукова методика забезпечення збереження властивостей робочих поверхонь деталей енергоефективними екологічно чистими методами» (№ 0116U002756), а також госпдоговору № 2-5 з приватним підприємством «КАРЛА МАРКСА-2» на тему «Розробка технології зміцнення і відновлення металевих поверхонь деталей с.-г. обладнання методом електроіскрового легування», де здобувач був виконувачем декількох розділів.

Метою роботи є підвищення зносостійкості поверхневих шарів деталей машин і їх елементів, працюючих в умовах інтенсивного гідроабразивного зношування, шляхом екологічно безпечного нанесення на їх поверхні композиційних зносостійких покриттів, сформованих методом електроіскрового легування, з наступною обробкою металополімерними матеріалами, армованими порошками з карбіду вольфраму, нітриду цирконію, або їх сумішшю.

Завдання для дослідження:

1. Провести аналіз причин зношування деталей машин, поверхні яких в процесі роботи контактують з абразивом, що знаходиться в потоках рідини і других важких умовах оточуючих середовищ.

2. Провести аналіз існуючих технологічних методів захисту сталейних і чавунних деталей машин від гідроабразивного і інших видів зношування і вибрати більш раціональні.

3. Оцінити можливість використання методу ЕІЛ з застосуванням спеціальних технологічних насичуючих середовищ (СТНС) для захисту сталейних і чавунних деталей машин від гідроабразивного і інших видів зношування.

4. Розробити систему направленої вибору технології захисту деталей машин від гідроабразивного і інших видів зносу.

5. Провести порівняльні випробування сталейних і чавунних зразків з різними захисними покриттями на гідроабразивний знос.

6. Розробити технологічні рекомендації екологічно й техногенно безпечного виготовлення й ремонту деталей машин, поверхні яких в процесі роботи підлягають гідроабразивному і другим видам зношування і впровадити результати досліджень у виробництво.

Об'єкт дослідження – технологічний процес формування функціональних покриттів на поверхні деталей машин та їх елементів, працюючих в умовах гідроабразивного зношування.

Предмет дослідження – закономірності технологічного процесу формування поверхневого шару із заданими експлуатаційними властивостями, що забезпечують необхідну якість (довговічність, екологічну безпеку, зносостійкість, працездатність) деталей машин та їх елементів, працюючих в умовах гідроабразивного зношування.

Методи дослідження

Метод системного аналізу дозволив дослідити умови роботи машин, деталі яких працюють в умовах гідроабразивного і ерозійного зношування, також зробити огляд технологічних методів виготовлення і ремонту їх відповідальних деталей.

Використання методу синтезу дозволило із усього різноманіття машин, шляхом поділення їх на окремі вузли та деталі виділити ті, що більш всього потребують керування параметрами якості їх поверхневих шарів.

При розробці системи цілеспрямованого вибору необхідної технології виготовлення та ремонту деталей, що працюють в умовах гідроабразивного і ерозійного зношування використовувалися: математична логіка і математичне моделювання.

Металографічний аналіз і дюрOMETричний аналізи сталених зразків проводився на сучасному обладнанні для визначення параметрів якості поверхневого шару: структури, суцільності та розподілу мікротвердості по мірі поглиблення. Шорсткість поверхневого шару оцінювалась на профілографі-профілометрі мод. 201 заводу «Калібр». Розподіл елементів по глибині шару досліджували шляхом проведення локального мікрорентгеноспектрального аналізу з використанням електронного мікроскопа, що сканує - Joel JSM-5400.

Наукова новизна отриманих результатів.

У дисертації вперше одержані такі нові наукові результати:

1. Встановлено функціональний взаємозв'язок між закономірностями технологічного процесу формоутворення поверхні деталі з заданими експлуатаційними властивостями і інтегральними показниками економічної ефективності та екологічної безпеки, що дозволило кількісно оцінити вплив кожної складової технологічного процесу ремонту на екологічну безпеку виробництва в цілому.

2. Експериментальними дослідженнями встановлено кореляційний зв'язок між ваговим і лінійним зносом сталених та чавунних зразків з електроіскровими покриттями та величиною енергії, витраченої на руйнування поверхневого шару, який в першому наближенні нагадує експоненціально зростаючу залежність. Отримано рівняння вагового та лінійного зносу захисних електроіскрових покриттів сталених та чавунних зразків і запропонований алгоритм для визначення їх констант (максимального вагового зносу Δm_n , максимального лінійного зносу Δh_n і енергії активації процесу зносу E_A).

3. Науково обґрунтовано та узгоджено параметри розробленої системи спрямованого вибору більш надійної і екологічно безпечної технології виготовлення і ремонту відповідальних деталей машин, які працюють у важких умовах гідроабразивного зносу.

4. На підставі встановлених кореляційних залежностей між енергією витраченою на руйнування поверхневого шару E_T та ваговим $\Delta m_{E3+ГЗ}$ та лінійним $\Delta h_{E3+ГЗ}$ зносом композиційних електроіскрових покриттів (КЕП) зразків, фізично обґрунтовано функціональні зв'язки між основними параметрами процесу зносу (рівняння зносу), що дозволяє по енергії, затраченій на руйнування поверхневого шару, визначати лінійний та ваговий знос КЕП покриття, а також вирішувати зворотну задачу - знаходити величину енергії руйнування поверхневого шару, необхідної для здійснення зносу певної кількості речовини або отримання необхідного лінійного зносу.

5. Для різних матеріалів зразків (сталь 45, сталь Р6М5 і високоміцний кулястий чавун ВЧ50) обґрунтовано розроблену методику визначення констант рівняння зносу: найбільшого вагового та лінійного зносу, відповідно $\Delta m_{E3+ГЗ \max}$ та $\Delta h_{E3+ГЗ \max}$), а також енергію активації процесу зношування E_A , які можуть бути критеріями вибору найбільш раціональної та екологічно безпечної технології виготовлення і ремонту відповідальних деталей машин, які працюють у важких умовах гідроабразивного зносу.

6. Експериментальними дослідженнями доведена економічна, технологічна, експлуатаційна і екологічна доцільність нанесення на металеві поверхні композиційних ЕІП компактними електродами з використанням СТНС в порівнянні з ЕІ, виготовленими шляхом спікання ПМ.

7. Експериментальними і порівняльними дослідженнями доведена перевага армування металополімерних матеріалів порошком нітриду цирконію при формуванні комбінованих зносостійких покриттів, нанесених в послідовності ЕІЛ Al $\rightarrow$ ЕІЛ (90%ВК6+ 10%1М) $\rightarrow$ МПМ (80% ZrN) на чавунні поверхні і з попередньою ЦЕІЛ на поверхні зі сталі для захисту від гідроабразивного зносу.

Особистий внесок здобувача.

Твердження і висновки, представлені в дисертаційній роботі, отримані автором самостійно. Це: обґрунтування і опрацювання методів досліджень, планування і проведення дослідів, розробка планів експериментів, а також їх здійснення. Постановка мети роботи і задач проведення досліджень, аналіз і

синтез отриманих результатів здійснювалися здобувачем разом з науковим керівником. Особистий внесок автора конкретизовано в списку публікацій. Внесок автора в роботи, виконані у співавторстві, полягав в розробці методів досліджень, що проводились і їх реалізації.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 15 наукових праць, з них: 4 статі у фахових виданнях України, 5 конференції, 3 патенти; 3 статті – в зарубіжних виданнях, що індексуються в науково-метричних базах Scopus або WOS. Структура та обсяг дисертації. Робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків, викладена на 200 сторінках машинописного тексту. Основний зміст роботи викладено на 134 стор., включаючи 52 рисунків та 30 таблиць. Список використаних джерел складається з 151 найменувань на 18 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ПРОБЛЕМИ ЗАХИСТУ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, ВІД ГІДРОАБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ

1.1. Загальні відомості

В різних галузях промисловості (сільськогосподарській, гірничодобувній, транспортній тощо) України, а також в ближньому та дуальному зарубіжжі працюють машини, які по своїм функціональним обов'язкам змушені контактувати з абразивними частками, які знаходяться в рідині, тобто піддаються гідроабразивному і ерозійному зношуванню (ГЗ і ЕЗ). Серед великого різноманіття обладнання що має проблеми з ГЗ і ЕЗ велика кількість відноситься до гідравлічних машин (ГМ). Це насоси і гідродвигуни, а ще центрифуги, арматура тощо.

Згідно [1] ГМ (гідромашина) (англ. hydraulic machine; нім. Hydromaschine) це енергетична машина, яка перетворює механічну енергію працюючої машини в механічну енергію рідини (або насупроти).

Насосом називають установку, яка змінює механічну енергію обертання робочого органу (робочого колеса) в гідравлічну енергію, пов'язану з пересуванням рідини. Він виконує роботу для пересування певної кількості рідини в наслідку забезпечення її енергією. Головне його призначення – підняття комплектного тиску осередку рідини, яка пересувається [2].

Гідродвигуном вважають машину яка перетворює механічну енергію лави рідини в енергію вихідної ланки. Гідродвигуни в залежності від характеру переміщення робочого механізму ділять на гідромотори, гідроциліндри, поворотні гідродвигуни [3].

Насоси поділяються на дві основні категорії: динамічні та об'ємні. Згідно [4] до *динамічних* насосів відносяться: відцентрові насоси (ВН) , які поділяються на вертикальні та горизонтальні, занурювальні та системи пожежних гідрантів (рис. 1.1, відповідно а, б, в, г), а до *об'ємних*: мембранні, шестеренні, перистальтичні, кулачкові, поршневі.



Рисунок 1.1 [4] - Вигляд ВН: а-вертикальний; б-горизонтальний;
в -занурювальний; г - системи пожежних гідрантів.

Серед усіх різновидів насосів ВН є найбільш розповсюдженими. Їх робота відносно проста, добре описана і ретельно перевірена. Вони надійні, високоефективні та досить недорогі у виготовленні. Щоразу, коли насос працює, тиск рідини зростатиме від входу насоса до його виходу. Зміна тиску буде рухати рідину по всій системі. ВН передає механічну потужність двигуна рідині завдяки робочому колесу (РК), яке обертається. Потік рідини затікає в центр РК і виходить з його лопаток. При цьому, відцентрова сила додає швидкість рідині, і кінетична енергія, може змінюватися на силу.

В вертикальних (консольних) ВН використовується особливий вал і конструкція, завдяки яким, він частково потрапляє в колодязь, а його підшипники знаходяться зовні котловану. Горизонтальні ВН залучають два або більше РК. Вони використовуються для насосних послуг. Кожна ступінь в основному є колекторним насосом.

Занурювальні ВН також відомі як дощові або каналізаційні. Їх можливо використовувати для перекачування зливових, ґрунтових вод, стічних вод, чорної води, сірої води, дощової води, промислових відходів, хімікатів тощо.

Пожежні насосні системи використовують в якості захисту проти пожеж, як житлових будинків, так і будівель промислового та іншого призначення. Вони

відрізняються можливістю збільшення сили в системі гідранта, бо магістралі недостатньо.

До об'ємних насосів відносять: мембранні, перистальтичні, кулачкові та поршневі насоси, відносно (рис. 1.2, а, б, в, г).

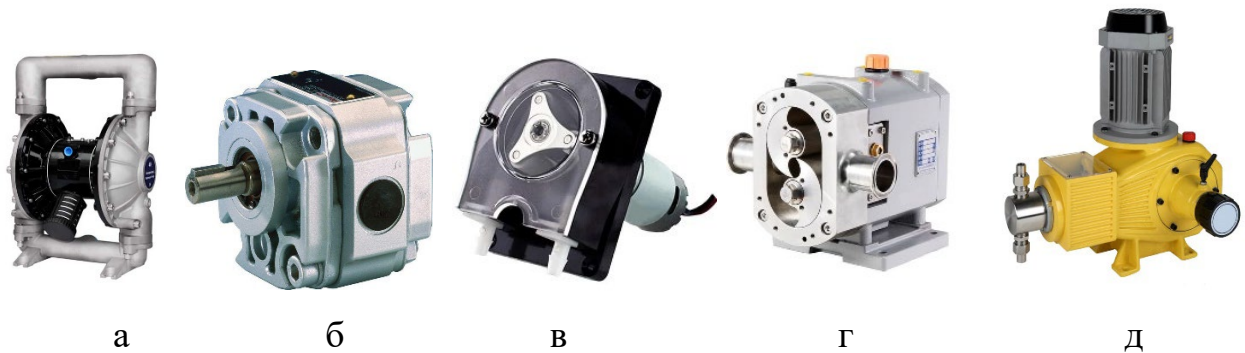


Рисунок 1.2 [4] – Вигляд об'ємних насосів: а – мембранних, б – шестеренних, в – перистальтичних, г - кулачкових та д – поршневих.

Мембранні насоси також відомі як насоси AOD (мембранні з пневматичним приводом). Застосування цих насосів включає головним чином безперервне застосування, наприклад в гірничій промисловості. Насоси AOD особливо підходять там, де немає електроенергії, а також використовуються в нестабільних і легкозаймистих зонах. Ці насоси також використовуються для перекачування хімічних речовин, промислових стічних вод, харчових виробництв, підземних вугільних шахт тощо.

Шестеренні насоси є обертовими об'ємними насосами, вони виробляють постійну кількість рідини з кожним обертом. Ці насоси переміщують рідину, входячи в механізми всередині та поза мережею для незбуджуючої дії накачування. Ці насоси здатні працювати з високими зусиллями та можуть ефективно перекачувати висококонцентровані рідини. Шестеренні насоси не містять клапанів, які викликають втрати, такі як тертя та високі швидкості робочого колеса. Таким чином, насоси підходять для перекачування густих рідин, таких як паливо та мастило.

Застосування перистальтичних насосів пов'язане з переробкою в хімічній, харчовій та водоочисній промисловості. Вони забезпечують постійний потік для

змішування і здатні перекачувати різні рідини, наприклад зубну пасту та різні хімічні речовини.

Лопастні (роторні) насоси мають різнопланову характеристику: гарна ефективність, стійкість до іржі, санітарна якість, надійність, мають кращу насосну камеру порівняно з шестеренчастими насосами, що дозволяє їм перемішувати суспензію тощо. Вони можуть перекачувати висококонцентровані рідини та тверді речовини, не завдаючи їм шкоди. Їх виготовляють з нержавіючої сталі та піддають поліровці.

Поршневий (плунжерний) насос, у якому ущільнення високого тиску пересуває поршень. Їх нерідко використовують для зрошення водою, коли потрібен високий та надійний тиск, а також в системах доставки при транспортуванні, наприклад, фарби або кондитерських виробів тощо.

До *гідродвигунів* відносяться: гідромотори, гідроциліндри, гідротурбіни. *Гідромотори* бувають: поршневими (робоча камера статична, а зворотно-поступальний рух здійснюється витискувачем) та роторними (робочі камери рухаються, а витискувач здійснює обертальний рух, або поєднуватися із зворотно-поступальним, як в кулісних гідромоторів).

Гідроциліндри розрізняють на силові. в яких шток двигуна з поршнем, виконує щодо циліндра зворотно-поступальний рух та моментні (квадратні), коли зворотно-поворотний рух валу відбувається по відношенню до корпусу під кутом, меншим 360° .

Гідротурбіни характеризуються тим, що перетворюють кінетичну або потенційну енергію рідини в механічну. Основною діючою ланкою механізму гідротурбіни є робоче колесо (ротор). Рідина установки діє на лопаті, які знаходяться по усьому обводу ротора, що засновує рух. Такі машини застосовують в якості приводу для електрогенераторів на гідроелектростанціях [5].

До машин, деталі яких зношуються в наслідок ГЗ слід віднести центрифуги, серед яких особливої уваги заслуговують центрифуги для стічних вод, які широко використовуються, як в сільському і комунальному

господарствах, так і на різних підприємствах [6]. В [7] показані граничні допустимі показники доброти води, що поступає для очищення (рис. 1.3).

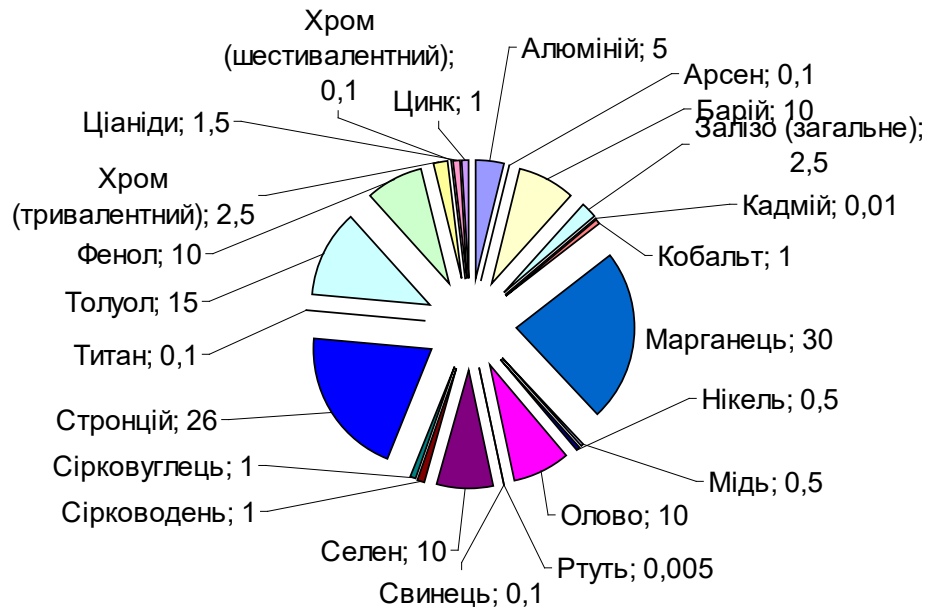


Рисунок 1.3 [7] – Гранично дозволена концентрація індикаторів у стічних водах, що надходять на очищення, г/м³.

Центрифуги осаджувальні, горизонтальні зі шнековим вивантаженням осаду типу ОГШ є одним з основних видів обладнання, що випускає АТ «СМНВО - Інжиніринг». Вони призначені для неперервного поділення рідких різномірних сумішей, що містять твердішу фазу. Крім цього, її щільність повинна бути вище за щільність рідкої фази. Ці центрифуги мають потрібну високу продуктивність. Її конструкція досить проста, але незважаючи на це вона забезпечує безперервність і надійність технологічного процесу. Вони потребують нескладного обслуговування і досить широко використовуються в різних галузях промисловості [8].

Загальна конструктивна схема типової протитечіної центрифуги представлена на рис. 1.4.

Ротор центрифуги розташований на опорах (3, 8) і разом зі шнеком обертаються в одному напрямку, але з різною частотою, тому шнек транспортує осад, що створився вздовж ротора, до вивантажувальних вікон 9 та вивантажується. Ротор вкритий люком 4. При перевантаженні спрацьовує

захисний пристрій 1 і вмикає центрифугу. При цьому відбувається звуковий і світловий сигнал. При включенні центрифуги рідина з мулом по трубі 7 рухається у нутрянну порожнечу шнеку, потім через отвори прибуває в ротор. Під дією відцентрової сили, що виникає від обертів ротора рідина з мулом, у вигляді суспензії, ділиться на фракції і її тверді частинки залишаються на бокових стінках ротору. Освітлена рідина через зливні вікна витікає з ротора по жолобу. Більшість деталей центрифуги виконується з зносостійкої жароміцної нержавіючої сталі 12Х18Н10Т. Вона відповідає вимогам стандарту ГОСТ 5632. Її використовують у виготовленні зварюваної апаратури для різних галузей промисловості.

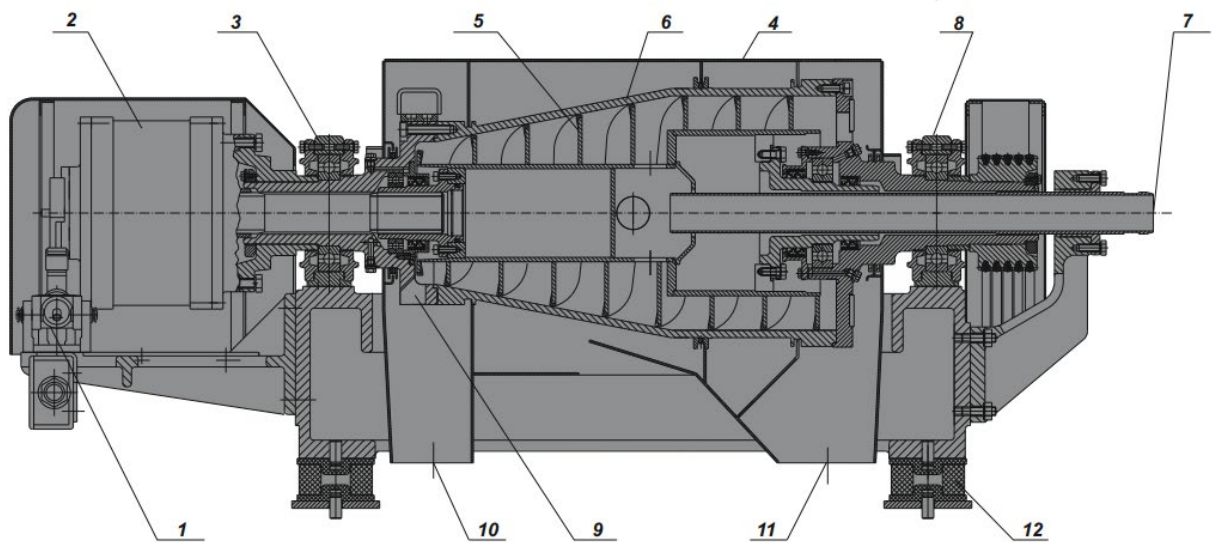


Рисунок 1.4 [7] – Схема осаджувальної горизонтальної шнекової центрифуги:

1 – пристрій що захищає; 2 – редуктор; 3 і 8 – підпорки ротору; 4 – люк з перебірками; 5 – шнек; 6 – конічний ротор; 7 – основний ротор; 9 – вивантажувальний отвір; 10 – приміщення для вивалювання осаду; 11 – камера пересування фугату; 12 – пристрій зменшаючий вібрацію.

В [9] рекомендують для захисту від негативного оточуючого середовища в якості матеріалів валу ротора та кожуху центрифуги марки ОГШ використовувати наступні матеріали, здатні протистояти ГЗ і ЕЗ: нелеговані сталі, корозійностійкі складнолеговані аустенітні сталі 12Х18Н10Т, які виготовляють згідно стандарту ГОСТ 5632.

1.2. Умови експлуатації і види зношування деталей

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 гідроабразивним зношуванням, а в результаті зношування поверхні тіла під дією потоку рідини – гідроерозійним.

Спрацювання деталей вище означеного обладнання, як правило, відбувається в наслідок мікроскопічного ударного впливу на їх поверхневі шари. Нерідко мікроударний вплив твердих часок в потоці посилюється присутністю хімічно активної складової. В такому випадку питання щодо надійності та довговічності виробу неможливо вирішити за рахунок звичних конструкційних матеріалів. Тому у технологів останні роки виникає значний інтерес до нових матеріалів, які можуть ефективно протистояти ГЗ і ЕЗ [9].

Впливу на знос поверхневих шарів деталей, як в результаті дії абразивних часток, так і негативного середовища відбувається при роботі шнеків транспортерів по видаленню гною і центрифуг для очищення стічних вод [10, 11].

Головними робочими органами пристосувань, завдяки яким відбувається пересування і видалення гною з приміщення тваринницької ферми є шнекові транспортери і навантажувачі. Також ці пристосування можуть використовуватись коли виникає необхідність в виготовленні природних добрив. Крім цього шнеки є основними пристосуваннями в центрифугах типу ОГШ, які широко використовують на тваринницьких та агропромислових комплексах коли потрібно поділити гній на окремі фракції [10, 12].

Слід відмітити, що як для шнеків для утилізації, транспортування і переробки гною, так і для шнеків центрифуг вплив абразивного, гідроабразивного зношування усугубляється за рахунок негативного середовища. Згідно [11] стверджується, що на території великих промислових комплексів, які

витримують дуже багато свиней, іншої рогатої худоби або птиці обов'язково стоїть потреба, пов'язана з переробкою гною. Накопичення в умовах ферми відходів, супроводжується розмноженням і поширенням патогенних мікроорганізмів, забрудненням оточуючого середовища токсикогенними сполуками в т. ч., важкими металами. Шкідливі речовини, які присутні в стічних водах, є додатковим фактором, що впливає на зношування поверхневих шарів деталей машин [7, 13].

ГЗ властиво для деталей паливної апаратури, двигунів, гідроприводів, в трубопроводах для пересування розчинів на будівництвах, інших речовин тощо. Носіями окремого матеріалу та його частинок може бути: паливо, змащувальні матеріали, гальмові або інші рідини. Інтенсивність і величина процесу зношування пов'язана і значно залежить від таких вирішальних чинників, як швидкість, кількість абразивних і інших шкідливих речей в потоці рідини, розміру абразивних часток [14].

Згідно [15], основними видами зносу гідроприводів являються гідроабразивний та втомний; вони викликані забрудненням робочої рідини механічними домішками та частими змінами тиску.

Незалежно від гідравлічних частин і компонентів, які використовуються у гідравлічному обладнанні, і типу плану технічного обслуговування, усі гідравлічні частини зношуються внаслідок нормального зносу. Коли вони починають зношуватися, можна помітити зміни в продуктивності системи.

Найпоширенішими причинами несправностей гідравлічної системи можуть бути процеси, пов'язані зі зносом гідравлічних компонентів, наприклад: погана якість масла; проблеми з температурою/спекою; витоки повітря; вода в нафті; неналежне використання системи; низький рівень рідини тощо.

Найкращими профілактичними режимами для запобігання зношенню гідравлічних частин може бути часта заміна гідравлічного масла та фільтрів. Наприклад, абразивний, адгезивний, ерозійний і корозійний знос можна зменшити, забезпечивши регулярну заміну рідини, не дозволяючи їй погіршуватися. Також повинно перевіряти рідину, щоб визначити, чи є в ній

частинки металу. Якщо вони є то потрібно визначити їх джерело та відремонтувати або замінити пошкоджені частини та компоненти.

Стосовно статистичних досліджень в межах 80-95 % інцидентів мотивом поломки гідроагрегату є зношування їх деталей. Також відмічається, що на протидію тертю витрачується до 40 % енергії [16, 17].

В [18] стверджується, що основною причиною зниження експлуатаційних характеристик і ресурсу шестеренних насосів (ШН) є зношування його деталей, а відмови насосів складають 67-75% [19].

В [18, 19] підкреслюють, що на сьогодні існує багато машини оснащених продуктивними способами безпеки робочих органів шестеренних насосів від контакту з абразивними частинками і мають захисні пристрої у вигляді різних видів ущільнень, фільтрів тощо. З появою в гідросистемах додаткових абразивних частинок автори вказують, що причиною зносу не є кавітаційне зношування, коли насос новий або тільки відремонтований.

В [20] підкреслюють, що під час роботи робочих органів та деталей машин, задіяних в сільському господарстві основним видом зносу є абразивне і гідроабразивне зношування.

Авторами проводились дослідження впливу агресивних корозійно-активних середовищ на величину зносу. Для того, щоб визначити який вплив мінеральні добрива надають на зносостійкість провели дослідження зразків зі сталей 45, 45Х2НФБА та 110Г13Л. Добрива змінювали кожні 60,0 хв. Результати зносу визначали зважуванням зразків до та після експерименту (табл. 1.1).

Таким чином, найбільший вплив на зношування надає хлористий амоній, а найменший селітра. Слід відмітити, що коли транспорт зупиняється (див. табл. 1.1) то відбувається найбільший знос, тому що шкідливі речовини діють на сталеву поверхню деталей набагато довше чим коли транспортне средство не зупиняється.

Таблиця 1.1 - Порівняна здатність зносу

Добрива	Сталь 45		Сталь 45Х2НФБА		Сталь Г13Л	
	з інтервалом	без інтервалу	з інтервалом	без інтервалу	з інтервалом	без інтервалу
Кальцеевидна селітра	1,2	1,0	1,1	1,0	1,2	1,0
Натрієва селітра	1,7	1,4	1,4	1,2	1,6	1,5
Сульфат амонія	2,4	1,8	1,9	1,6	2,1	1,9
Хлористий амоній	6,5	4,9	2,5	2,2	4,4	3,8

Автори [21] досліджували роботу відцентрових і осьових насосів при перекачуванні води з високим вмістом осаду. Показано, що досвід експлуатації цих насосів потребує необхідність наукового обґрунтування та експериментальної перевірки ефективності їх роботи що призводить до інтенсивного кавітаційно-абразивного зношування їх деталей та пов'язаними з цим високими експлуатаційними витратами [22-24].

Техніко-економічні наслідки зношування насосів проявляються внаслідок впливу комплексної дії кавітації та абразиву. В результаті негативних процесів кавітації та абразиву погіршуються енергетичні характеристики насоса і збільшується, пов'язане з цим, споживання енергії. Також необхідно періодично здійснювати ремонтні роботи з усунення наслідків зносу. Крім цього, внаслідок зниження водопостачання від насосів, знижується врожайність сільськогосподарських культур.

Проведені дослідження встановили, що перевитрати енергії, викликані зниженням ККД насосів, можна оцінити в межах 6 - 7 % від загальної кількості електроенергії, що була ними спожита. Проблема підтримки високого ККД насосного обладнання є надзвичайно актуальною і важливою [25].

Співробітники лабораторії експлуатації насосних станцій Андижанського інституту сільського господарства та Агротехнології [26] 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°C.

Найвищу зносостійкість мають полімерні матеріали на основі епоксидної смоли з карбідом кремнію, при цьому силумін 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 [27].

В [21] автори приводять ряд основних причин, чому полімерні матеріали не знайшли бажаного використання в якості покриттів при виготовленні деталей насосів:

- низька зносостійкість поверхневих шарів деталей при високій вартості процесу нанесення покриття;
- збільшення величини шорсткості поверхневих шарів при покритті полімерними матеріалами і як результат виникнення додаткових опор і зниження ККД насосу;
- складна технологія нанесення покриттів.

Автори [28] досліджували залежність між процесом зношування деталей змішувачів бетону та хімічним складом їх матеріалів.

Аналіз робіт [29–31] показав, що термін служби компонентів змішувача (особливо лопатей змішувача та бронювання стінок змішувача) залежить від розміру та природи заповнювачів, ступеня кислотності цементного пилу та частки піску в заповнювачах. Механізм зношування бетонозмішувача важко контролювати, оскільки зношування обладнання є результатом удару та стирання суміші частинок — одні дуже малих розмірів (пісок, цемент і клеї), а інші — більшого розміру (заповнювачі) — у присутності води разом із корозійним зносом,

спричиненим кислотністю бетону. Ерозійний знос, характерний для суміші дрібних частинок, підтверджується деградацією, спричиненою впливом великих частинок на активні елементи. Рівень механічної напруги, згідно з результатами різних дослідників [32–34], головним чином залежить від твердості змочених частин змішувача, швидкості удару та кута удару. Різні дослідники [35–37] вивчали робочу поведінку компонентів змішувача та механічні напруги, характерні для змішувачів і лопатей. У [32, 36, 37] проаналізовано стан напруги в змішувачах і лопатях змішувачів і в першу чергу використовували їх як індикатор для оцінки абразивного зношування внаслідок удару та тертя об агрегати. Абразивне зношування створює значні проблеми для промисловості бетономішалок, оскільки відбувається як у сухих, так і вологих умовах. Елементи, що обертаються, зазвичай виготовляються зі сталі, і стійкість до стирання сталі визначає термін служби та масу барабана. У [38] автором розроблено експериментальний стенд для перевірки відносної зносостійкості різного типу 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.

Новизна дослідження [28] полягає в тому, що в при проведенні експериментів використовували широкий спектр чавунів різних марок, які найбільш задіяні в різних галузях промисловості. Автори проводили прискорені випробування в лабораторних умовах з метою дослідження інтенсивності явища зношування змішувальних лопатей в абразивному/ерозійному середовищі. На практиці для такого обладнання використовують чавуни, з різними варіантами легування хромом. Найбільш поширені варіанти з 4%, 9% та 25% Cr.

Для експериментальної програми, яка включала три серії випробувань в умовах прискореного зношування, які повторювали фактичне робоче середовище (суміш мінерального заповнювача, піску, цементу та води), використовували три типи легованого (хромованого) чавуну.

Результати показали, що незалежно від середовища випробування, чавун з найвищим вмістом хрому продемонстрував найкращу зносостійкість. Проте не можна зробити висновок, що зносостійкість досліджуваних чавунних матеріалів

підвищується безпосередньо внаслідок збільшення вмісту хрому. Для чавуну з меншим вмістом хрому (приблизно 4%) спостерігалася краща трибологічна поведінка при вмісті хрому менше 25%, ніж для чавуну з більш високим вмістом хрому (приблизно 9%).

Для промислових застосувань, специфічних для виробництва цементного бетону, рекомендується 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.

Згідно [39] погіршення стану та знос деталей ВН викликано: «забрудненням», спричиненим прилипанням частинок до поверхонь потоку; корозією» — втратою або псуванням матеріалу деталі під дією води (спричинене хімічними реакціями); «ерозією» - абразивним видаленням матеріалу з шляху потоку твердими частинками, які стикаються з поверхнями потоку насоса; «стиранням», що виникає, коли поверхня, що обертається, треться об нерухому поверхню. Сторонні предмети також можуть пошкодити компоненти насоса. «Корозія» має тенденцію змінювати шлях потоку води двома способами; це збільшує шорсткість поверхні, але також може видалити матеріали з відповідальних деталей ВН. Підвищена шорсткість поверхні може спричинити товщі граничні шари як на рухомих деталях, наприклад РК, так і на нерухомих, наприклад частини корпусу ВН, що контактують з водою, і таким чином зменшити пропускну здатність. В результаті проведення відповідних дослідів встановлено зв'язок між збільшенням зазорів та продуктивністю відцентрових насосів. У дослідженні ВН зазор було збільшено з 2,5% (проектне значення) до 4,6%, в результаті, приблизно, на 7% знизився коефіцієнт тиску та близько 2,3% втратилась ефективність.

Таким чином, в процесі роботи гідравлічних машин і іншого обладнання, їх деталі зношуються, тобто поступово змінюються їх геометричні параметри в процесі тертя.

Згідно [40] особливості цього процесу залежать від: виду тертя, механічних і фізико-хімічних властивостей матеріалу, швидкості пересування однієї

поверхні тертя, відносно іншої, а також розміром і видом навантаження, різновидністю і якістю мастил, характером дії і таке інше.

В залежності від особливостей в яких протікає процес тертя існують різні види зношування: розрізняють декілька видів зношування. Це: *корозія, ерозія, кавітація, біологічне пошкодження*.

Корозія металу є небезпечною та надзвичайно дорогою проблемою. Найпоширеніші види корозії виникають в результаті електрохімічних реакцій. Загальна корозія виникає, коли більшість або всі атоми на одній поверхні металу окислюються, пошкоджуючи всю поверхню. Більшість металів легко окислюються: вони мають тенденцію втрачати електрони до кисню (та інших речовин) у повітрі або воді. Коли кисень відновлюється (отримує електрони), він утворює оксид з металом.

Коли відновлення та окислення відбувається на різних типах металу, що контактують один з одним, процес називається гальванічною корозією. Під час електролітичної корозії, яка найчастіше зустрічається в електронному обладнанні, вода або інша волога затримується між двома електричними контактами, між якими діє електрична напруга. Результатом є непередбачений електролізер. Таким чином корозія металу виникає в результаті хімічної реакції металу з рідинами або газами, що знаходяться в оточуючому середовищі [41].

На рис. 1.5 показане корозійне руйнування поверхневих шарів робочого колеса турбіни.



Рисунок 1.5 [40] – Руйнування поверхневих шарів робочого колеса турбіни в результаті корозії

Ерозійне зношування – полягає в прискоренні або посиленні впливу на метал через різницю у швидкості корозійної рідини та поверхні металу. Загалом ця швидкість є високою, і часто пов’язана з наслідками механічного зносу та стирання. Ерозійна корозія є результатом сильної турбулентності на певній ділянці внаслідок порушення схеми потоку, наприклад, у трубі за звуженням, перешкодою або вигином.

Метал видаляється з поверхні у вигляді розчинених іонів або стабільних розмірів продуктів корозії, які механічно стираються з поверхні металу. Ерозійна корозія може легко виникнути у випадку м’яких металів або якщо захисний шар на поверхні металу пошкоджено. Ерозійна корозія незмінно протікає у вигляді посиленої загальної корозії.

Тверді частинки або повітряні бульбашки в рідинах є особливо руйнівними в процесі ерозії та корозії. Ерозійну корозію, як правило, можна розпізнати за чіткою картиною течії у формі гладких ям, канавок, хвиль або ярів. Рідина здвигає себе аналогічно клину, розштовхуючи бічні краї макро- та мікротріщин [41].

Гідроабразивне зношування – відбувається коли тверді частинки (абразив) переносяться потоком води. При цьому зіткнення частинок з поверхнею деталі викликають пошкоджуючу дію, а руйнівний ефект вирішальною мірою залежить від кута удару та властивості матеріалу зразка. ГЗ зустрічається у великій кількості технічного обладнання, наприклад, у будівництві трубопроводів, гідроенергетичних турбін або при глибокому бурінні. технології.

Пластичні матеріали швидше руйнуються в результаті зрізання мікростружки, тоді як тверді та крихкі матеріали, як правило, стираються внаслідок руйнування або розбивання.

ГЗ під дією твердих частинок є загальною формою ЕЗ, яке виникає у наслідку періодичних ударів дрібних твердих частинок, що контактують з поверхнею твердого тіла [43].

Кавітація (від латинського *cavitas* – порожнина) характеризується появою у потоці рідини кавітаційних *бульок* і “мішків”, в яких знаходиться пар, газ або повітря. Вони виникають зі зниженням тиску рідини в порівнянні з *насиченою*

парою при даній температурі. При наступному підвищенні тиску відбувається руйнування пухирців, тиск зростає до десятків атмосфер, і якщо процес схлопування відбувається на поверхні деталі, то вона руйнується (рис. 1.6) [40, 42].

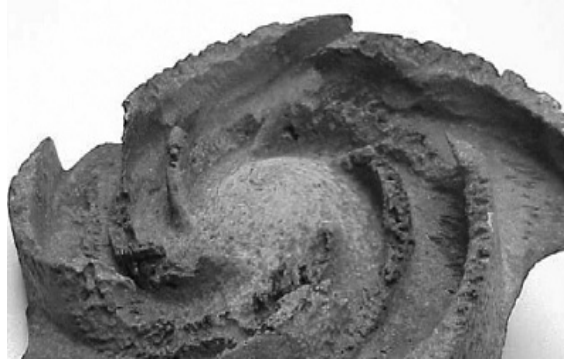


Рисунок 1.6 [40] – Зруйнований напрямний апарат насоса в результаті негативного впливу кавітації.

Біологічні пошкодження з'являються на поверхнях деталей в результаті *плісняви* (рис. 1.7, а) в прошарку якої виникають *ферменти*, що знищують матеріал, а кислоти (лимонна, щавлева) викликають корозію металів. Крім того, шкоди завдають *молюски*, які знаходяться у воді (рис. 1.7, б) [40].



а



б

Рисунок 1.7 [40] – Пліснява на моторі-редукторі очисника фар автомобіля (а) та вигляд дії молюсків на занурені у воду деталі машин (б).

Згідно [44] біокорозія, по-перше, полягає в тому, що мікроби викликають корозію безпосередньо, що зазвичай означає, що мікроби виділяють корозійні метаболіти або мікроби збирають електрони з металу для дихання для виробництва енергії. По-другому мікроби стоять за ініціацією або прискоренням

корозії, спричиненої раніше існуючим корозійним агентом, таким як вода та CO_2 , шляхом руйнування пасивної плівки (часто плівки оксиду металу на металі).

Може бути марним класифікувати мікроби на корозійні та некорозійні. Але багато видів мікробів можуть так чи інакше викликати або прискорювати корозію. Багато мікробів здатні виробляти органічні кислоти.

З певних міркувань біокорозію можна вивчати як окремий процес, але, як правило, вона об'єднується з іншими процесами, наприклад, атмосферною або ґрунтовою корозією [45]. При цьому мікроорганізми не тільки самі руйнують метал, але часто є ініціаторами або супроводжують хімічні, або інші процеси корозії [46].

1.3 Технологічні методи захисту деталей від зношування

При виготовленні і зміцненні деталей машин висока продуктивність праці повинна співпадати з високою якістю та відсутністю браку продукції [47]. Особлива увага приділяється якості поверхонь, та механічним властивостям деталей обладнання, надійна робота якого пов'язана з безпекою та здоров'ям людей, наприклад деталям машин та механізмів, що працюють в умовах радіаційного опромінювання [48, 49]. Ще на стадії технологічної підготовки виробництва, при механічній обробці технологи приділяють велику увагу точності позиціонування заготовки на верстатах [50], вивченню вільних і вимушених коливань задіяної системи «пристосування–заготовка» [51–53]. Питання підвищення якості робочих поверхонь деталей машин і механізмів, конструювання їх поверхневих шарів може бути вирішено геометричними методами. Так у [54] складено диференціальні рівняння руху гнучкої стрічки, що не стискується з прямокутним перерізом вздовж внутрішньої шорсткої поверхні горизонтального циліндру. Стрічка рухається з заданою постійною швидкістю вгору перпендикулярно твірним циліндра, тобто траєкторією її руху є переріз циліндра. Є роботи присвячені руху частинки під дією сили власної ваги по шорсткій гвинтовій поверхні, утвореній гвинтовим рухом синусоїди, що розташована у вертикальній площині і є осьовим перерізом гвинтової поверхні [55], по сферичному сегменту, який обертається навколо вертикальної осі [56], по

хвилястий поверхні з перерізом у вигляді синусоїди [57], по внутрішній поверхні горизонтального сферичного диска [58].

З метою підвищення якості поверхневих шарів виробів, крім покращення геометричних параметрів, велика увага приділяється нанесенню захисних покриттів, широкий набір яких визиває між ними конкуренцію і ускладнення вибору кращого матеріалу і більш раціональної технології їх нанесення.

Найбільш затребуваними технологіями для нанесення захисних покриттів вважаються напилювання твердими зносостійкими матеріалами [59-61], лазерна обробка [62–65], нанесення нанокомпозитів [66]. Для захисту деталей від абразивного зносу використовують шлікерні покриття зносостійкими матеріалами [67], наприклад, що складаються з твердосплавної суміші ВК-6 і твердого розчину системи: нікель (Ni) – хром (Cr) – кремній (Si)- бор (В). Їх закріплюють на робочій поверхні деталей з наступним відпалом у вакуумі. Серед шляхів поліпшення якості поверхневого шару деталей за рахунок зміцнення їх поверхневих шарів особливе місце займає хіміко-термічне оброблення (ХТО) [68–71] та ін.

Серед розглянутих методів відновлення деталей великої уваги заслуговує електроіскрове легування (ЕІЛ), яке є екологічно безпечним і часто затребуваним в ремонтних технологіях [71–75]. Метод має ряд специфічних особливостей: матеріал анода (матеріал, яким легують) може утворювати на поверхні катода (поверхня, яку легують) покриття, матеріал якого щільно з'єднаний з поверхневим шаром деталі, що підтверджується дифузією елементів анода в катод [76]; легування можна здійснювати у окремих місцях і при цьому не потрібно забезпечувати спеціальний захист інших поверхонь деталі; технологія ведення ЕІЛ виробів не складна, а обладнання легко транспортується.

В [77] представлені результати порівняльних досліджень нанесення покриття на поверхню деталі зі сталі 12Х18Н10Т. При дослідженні покриття наносили двома способами: наплавленням електродом марки ОК61.30 $\varnothing$ 2,5 мм і методом ЕІЛ при $W_p = 3,4$ Дж ЕІ з твердого сплаву Т15К6. При наплавленні в оточуючому середовищі виявляється присутність вуглекислого газу CO_2 і

нестабільних іонів NO, які є дуже небезпечними (отруйними) навіть в незначних кількостях.

При нанесенні покриття на сталь 12X18H10T методом ЕІЛ мас-спектр оточуючого середовища як в чистому повітрі. Невеликі відхилення виявляються тільки в кількості водяної пари, що можна пояснити різною вологістю повітря.

Побік з гамою плюсів, серед яких: є кріпке з'єднання перенесеного матеріалу з основою; локальність процесу тощо, метод ЕІЛ має і низку недоліків (збільшення шорсткості поверхні, виникнення в поверхневому шарі розтягувальних напружень, зменшення втомлювальної міцності та ін.), які суттєво зменшують його використання.

Усунути недоліки ЕІЛ можливо шляхом чергування твердих зносостійких та м'яких антифрикційних матеріалів, а також виготовленням нових електродних матеріалів (а. с. 806338, МКИ 23 Р 1/12; а. с. 833418, МКИ 23 Р 1/18; а. с. 1106623, МКИ 23 Р 1/12; а. с. 1488142, МКИ В 23 Н 1/06; а. с. 1488338, МКИ В 23 Н 1/06; а. с. 1098740, МКИ 23 Р 1/18; а. с. 412274, МКИ С; а. с. 377387, МКИ С 22с 27/00).

Слід звернути увагу, що при механічній обробці поверхонь деталей, як правило, є відхилення від ідеальної геометричної форми, які називають похибками. Накопичення похибок значно знижує реальну площу контактуючих поверхонь і великої ймовірності утворення задир. Для компенсації похибок і підвищення площі контакту між контактуючими поверхнями виникає необхідність формування на них спеціальних покриттів, що поліпшують триботехнічні умови тертя.

Нами, в [78] з метою покращення трибологічних властивостей контактуючих робочих поверхонь деталей в період припрацювання, запропонований новий спосіб сульфідкування, який використовують при ЕІЛ.

Таким чином, враховуючи перспективність покриттів що складаються з твёрдосплавної суміші ВК-6 і твёрдого розчину системи: нікель (Ni) – хром (Cr) – кремній (Si)- бор (В) і компактних ЕІ, виготовлених за допомогою порошкової металургії, які мають найкращий склад 90% ВК6 + 10% 1М, де 1М - 70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% В [79] виникає науковий та практичний інтерес для їх подальшого дослідження.

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 середовищ (СТС), які попередньо наносяться на поверхню, що легується, у вигляді паст чи суспензій [80-82].

Аналіз літературних і патентних джерел показав, що для підвищення якості поверхонь деталей існує багато технологічних методів, пов'язаних зі зміцненням поверхневого шару, нанесенням захисних покриттів, механічною обробкою, дослідженнями геометрії руху контактуючих поверхонь, тощо. Показано, що одним з перспективних методів нанесення покриттів є електроіскрове легування. Удосконалення технології ЕІЛ за рахунок виготовлення електродів інструментів методом порошкової металургії дало змогу наносити на поверхні деталей, що в процесі роботи підлягають абразивному зносу, зносостійкі покриття складу 1М і 90% ВК6 + 10% 1М, які раніше наносили шлікерним методом, що має багато значних недоліків. Вироби, оброблені шлікерним методом, мають недостатню надійність і довговічність внаслідок того, що через руйнування сформованого шлікерного покриття відбувається відмова їхньої працездатності. Всі методи контролю формування

Технологія нанесення шлікерних покриттів не гарантує їх якості з'єднання з основою. нанесеного матеріалу з підкладкою.

Як правило, перед нанесенням шлікерного покриття проводиться очищення поверхні. На ділянках фактичного контакту поверхонь діють сили молекулярного притягання. Перехідний шар, який зумовлює міцний механічний зв'язок, відсутній, що негативно впливає на якість адгезії в цілому. Крім того, вказаний спосіб є достатньо дорогим і трудомістким через процеси виготовлення, нанесення та відпалу покриттів.

Незважаючи на це, слід відмітити, що технологія електроіскрового легування з використанням електрод-інструментів з матеріалів складу 1М і 90% ВК6 + 10% 1М є значно кращою від нанесення їх шлікерним методом, але процедура виготовлення електроди методом порошкової металургії також є дуже складною, енергоємною, довготривалою та достатньо вартісною. Незважаючи на

це, слід відмітити, що технологія ЕІЛ, з використанням електродів-інструментів з матеріалів складу 1М і 90% ВК6 + 10%1М, значно краща від нанесення їх шлікерним методом, але процедура виготовлення електроду методом порошкової металургії також дуже складна, енергоємна, довготривала і досить вартісна. Суміш 1М готується з тонкодисперсних порошків нікель (Ni), хром (Cr), кремній (Si) і бор (B) з розмірами частинок трохи більше 40 мкм. Порошки просушуються в сушильних шафах при 150 - 200 0С, просіюються через сито 0075, завантажуються необхідна кількість їх згідно з рецептурою в спеціальний змішувач, і проводиться механічне змішування протягом 24 год. Для приготування суміші ВК6 використовується готова твердосплавна суміш типу ВК6, вона просушується у вакуумі з розрідженням не менше 110 -1 мм. рт. ст. при 150 0С, потім просіюється через сито 0075. Після того, як твердосплавна та самофлюсуюча суміші готові, їх завантажують в змішувач і піддають змішуванню протягом 24 годин у співвідношенні: 90% ВК6 + 10% 1М. Потім суміші замішуються з пластифікатором (5% розчин синтетичного каучуку в бензині). Заготовки необхідних розмірів пресуються у формах (тиск 0,70 - 1,0 т/см²), які потім спікаються при 1400 - 1500 0С у захисній атмосфері (водень) печі, що дозволяє забезпечити потрібну температуру.

Крім цього, з літературних джерел відомо, що на підприємствах, обладнання яких працює в умовах радіаційного опромінювання, при виготовленні і відновленні деталей виробів не допускається використання кобальту [83-85]. Так у [86] відзначається, що при виборі конструкційних матеріалів для ядерних енергетичних установок різних типів забороняється наявність елементів, які при опроміненні можуть бути постачальником шкідливих подовгу живучих ізотопів. Наприклад, кобальт, який неможливо вживати в ущільненнях насосів АЕС і котрий можна замінити на нікель [87]. В [88] стверджується, що деталі, які контактують з теплоносієм, не можуть мати в своєму складі кобальт. Вони виготовлені із сталей, стійких проти корозії та ерозії. У [89] описаний композитний матеріал для радіаційного захисту, в якому як наповнювач полістирольної матриці використані порошки вольфраму та алюмінію. В [90–94] описані результати досліджень впливу високоточного

електронного пучка при опроміненні поверхневих шарів металів і сплавів з метою покращення їх якості.

Таким чином, представляє як науковий, так і практичний інтерес дослідити параметри якості і властивості поверхневих шарів складу 90% ВК6 + 10%1М, в склад яких входить кобальт і 1М (70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% B), сформованих на сталюх підкладках, які можуть бути корисними для захисту поверхневих шарів, як в загальному машинобудуванні, так і на виробництвах, де може бути радіаційне опромінювання.

На наш погляд, технологію нанесення зносостійких покриттів методом ЕІЛ, з використанням електродів-інструментів складу 1М і 90% ВК6 + 10%1М, що виготовляють шляхом порошкової металургії, можна удосконалити за рахунок використання спеціальних технологічних середовищ, які попередньо наносяться на поверхню що легується.

На сьогодні, в різних галузях господарства України, від сільськогосподарського та комунального хазяйства до атомно-енергетичної та аерокосмічної промисловості 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 оптимальному поєднанню ливарних, фізико-механічних і експлуатаційних властивостей та економічності їх виробництва, широко застосовуються в сучасному машинобудуванні [95]. Завдяки їх механічним характеристикам ($\sigma_{0,2} = 370 \dots 700$ МПа, $\delta = 2 \dots 7$ %, твердість за шкалою Брінелля 153...360 НВ) з них можуть виготовляти деталі такі як із сталі, або інших сплавів [96]. З високоміцних чавунів на перлітній основі, марок ВЧ 50, ВЧ 60, ВЧ 70, ВЧ 80, ВЧ100, виготовляють поршневі кільця, гільзи, шестерні, деталі двигунів, насосів, виливниці, прокатні валки, тощо [97].

Багато деталей з чавуну зміцнюють і відновлюють шкідливими екологічно небезпечними методами, такими як деякі методи ХТО, зварювання тощо.

Для усунення дефектів при ремонті чавунних деталей широко застосовують зварювальні процеси і методи наплавлення. У різних галузях промисловості використовують одні і ті ж методи зварювання, які дещо відрізняються за технологічними прийомами і застосовуваними зварювальними матеріалами [98, 99]. Згідно [100], відновлення зруйнованих ділянок діафрагми (рис. 1.8) компресора «PCL» проводили шляхом електродугового наплавлення на апарату ТДМ-305 шару нікелю спеціальними електродами UTP 86 FN Ø 4 мм.



а



б

Рисунок 1.8 – Місце руйнування діафрагми компресора «PCL» (а), кольорова дефектоскопія зруйнованої ділянки (б).

Технології підвищення параметрів якості поверхневих шарів чавунних деталей, а також виправлення дефектів на їх поверхнях різного експлуатаційного призначення повинні бути екологічно безпечними. Роботи присвячені поліпшенню існуючих методів і розробленню нових технологій ремонту і зміцнення поверхневих шарів деталей з чавуну актуальні і своєчасні.

Велика кількість зміцнюючих і ремонтних (відновлюючих) технологій, направлених на підвищення параметрів якості поверхневих шарів деталей, а також безліч матеріалів для їх здійснення, роблять дуже складним вибір більш доцільної.

В результаті літературного і патентного огляду встановлено, що для покращення поверхневих шарів деталей з чавунів різних марок існує велика кількість технологій [101-105]. В [106] авторами був проведений такий аналіз. В результаті перемогли методи, які ґрунтуються на технологіях, що використовують висококонцентровані джерела енергії: електролітичний метод

[107, 108], газотермічне напилення [109, 110], лазерної обробки [111 - 114] та ЕІЛ. Серед розглянутих технологій кращою була обрана технологія ЕІЛ.

Недоліки формування поверхневих шарів багатьох деталей методом ЕІЛ, про які уже згадували вище і до яких слід також віднести зменшення утомної міцності [115], можна як значно знизити, так і зовсім прибрати, за допомогою комбінованих технологій (КТ). Так знизити шорсткість поверхні і збільшити утомну міцність можливо шляхом використання після ЕІЛ методу поверхневого пластичного деформування (ППД), одним із різновидів якого є метод безабразивної фінішної обробки (БУФО) [116]. Також відома КТ, яка полягає в ЕІЛ з наступною обробкою металополімерними матеріалами (МПМ) [115, 117], твердість яких можна підвищити за рахунок дозованого змішування їх з порошком карбіду або нітриду металів, наприклад, карбіду вольфраму.

Перспективними технологіями для підвищення параметрів якості поверхонь деталей з чавуну марки ВЧ перспективними можуть бути покриття нанесені методом ЕІЛ коли в якості ЕІ використовують матеріали складу 90% ВК6 + 10%1М, нанесення яких на сталеві поверхні забезпечують підвищення мікротвердості до 14200 МПа [118].

Порошок нітриду цирконію можна дослідити в якості матеріалу для підвищення твердості, зносостійкості і інших властивостей МПМ, які наносять на поверхневі шари, сформовані методом ЕІЛ для покращення поверхонь деталей [119].

З літературних джерел [120] відомий спосіб зміцнювання поверхневих шарів сталених деталей за рахунок комбінації з декількома екологічно безпечними технологіями. Це шліфування поверхні деталі; цементация методом ЕІЛ; алітування методом ЕІЛ; формування покриття з твердого сплаву Т15К6. Потім поверхню обкатують кулькою; наносять МПМ зміцнений порошком з суміші ВК6 і після полімеризації (висихання) шліфують до покриття з твердого сплаву Т15К6. Така технологія дуже складна і високовартісна.

На наш погляд було б доцільно дослідити зносостійкість покриттів, сформованих КТ, сформованих на поверхнях деталей з чавуну марки ВЧ в послідовності: шліфування поверхні деталі; алітування методом ЕІЛ; ЕІЛ

твердим сплавом Т15К6; обкатка кулькою; нанесення МПМ зміцненого порошком з суміші ВК6; шліфування до покриття з твердого сплаву Т15К6, а також покриттів, складу (90% ВК6 + 10% 1М), нанесених методом ЕІЛ.

Враховуючи те, що не тільки деталі машин в процесі роботи підлягають гідроабразивному зношуванню, а і металорізальні інструменти під час обробки деталей піддаються як абразивному зношуванню, так і охолодженню спеціальною рідиною (вода, емульсія тощо). Тобто також підлягають гідроабразивному зносу. Таким чином, виникає необхідність дослідити зносостійкість покриттів, складу (90% ВК6 + 10% 1М), сформованих на поверхні найбільш поширеної інструментальної сталі Р6М5.

1.4. Висновки:

1. До машин і пристроїв, що працюють в різних галузях газо-нафтовій, гірничодобувній, хімічній, сільськогосподарській, транспортній тощо, деталі яких зношуються в наслідок **гідроабразивного зношування**, відносяться гідравлічні машини, серед яких найбільш розповсюдженими є насоси і гідродвигуни, а також центрифуги, для очищення стічних вод, сепаратори, арматура і таке інше.

2. 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*.

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

4. Для захисту поверхонь деталей від зносу, крім зміцнення поверхневих шарів, серед яких особливе місце займає хіміко-термічне оброблення,

використовують нанесення захисних покриттів: напилювання і наплавлення твердими зносостійкими матеріалами, лазерна обробка шлікерних покриттів, які є шкідливими для здоров'я людини і небезпечними для оточуючого середовища.

5. Серед ефективних, енергоощадних і екологічно безпечних технологій нанесення захисних покриттів, особливе місце займає електроіскрове легування, яке в комбінації з поверхневим пластичним деформування і нанесенням металопластичних матеріалів, армованих порошками твердих зносостійких матеріалів (карбід вольфраму і нітрид цирконію) може забезпечити захист деталей від гідроабразивного і інших видів зносу.

6. Альтернативою технології нанесення методом ЕІЛ захисних покриттів електродами-інструментами складу 90%BK6+10%1M, виготовленими методом порошкової металургії, може бути більш технологічна і дешевша технологія використання ЕІЛ з застосуванням спеціальних технологічних середовищ.

7. За матеріалами розділу опубліковані наступні роботи [78, 121, 122].

1.5. Мета роботи і задачі дослідження

Метою роботи є підвищення зносостійкості поверхневих шарів деталей машин і їх елементів, працюючих в умовах інтенсивного гідроабразивного зношування, шляхом екологічно безпечного нанесення на їх поверхні композиційних зносостійких покриттів, сформованих методом електроіскрового легування, з наступною обробкою металополімерними матеріалами, армованими порошками з карбіду вольфраму, нітриду цирконію, або їх сумішшю.

Для виконання поставленої мети потрібно вирішити наступні **завдання**:

1. Провести аналіз причин зношування деталей машин, поверхні яких в процесі роботи контактують з абразивом, що знаходиться в потоках рідини і других важких умовах оточуючих середовищ.

2. Провести аналіз існуючих технологічних методів захисту сталейних і чавунних деталей машин від гідроабразивного і інших видів зношування і вибрати більш раціональні.

3. Оцінити можливість використання методу ЕІЛ з застосуванням спеціальних технологічних насичуючих середовищ (СТНС) для захисту сталейних і чавунних деталей машин від гідроабразивного і інших видів зношування.

4. Розробити систему направленої вибору технології захисту деталей машин від гідроабразивного і інших видів зносу.

5. Провести порівняльні випробування сталейних і чавунних зразків з різними захисними покриттями на гідроабразивний знос.

6. Розробити технологічні рекомендації екологічно й техногенно безпечного виготовлення й ремонту деталей машин, поверхні яких в процесі роботи підлягають гідроабразивному і другим видам зношування, а також провести апробацію і впровадження результатів досліджень у виробництво.

РОЗДІЛ 2

СПРЯМОВАНИЙ ВИБІР ТЕХНОЛОГІЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НЕОБХІДНОЇ ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, ПРАЦЮЮЧИХ В УМОВАХ ГІДРОАБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ

2.1. Системний підхід до вибору технологій управління параметрами якості поверхневих шарів деталей машин, що працюють в умовах ГЗ

Згідно [121] категорія “якість” дуже складна та багатогранна з погляду різних її аспектів, тому вона вимагає точного формулювання. Завдяки тому, що для якісного забезпечення конкурентоспроможності машинобудівної продукції виробництва мають бути зорієнтованими на потреби споживачів і на сьогодні, і на майбутнє, слід посилатися на існуюче в Міжнародній організації зі стандартизації поняття якість. В Стандарті ISO 8402-86 сформульоване поняття якість, як “сукупність властивостей і характеристик продукції чи послуг, що надають їм спроможність задовольняти обумовлені або передбачувані потреби” [122].

ДСТУ ISO 9000- 2001 якість трактує як „ступінь, до якого сукупність власних характеристик задовольняє вимоги” [123].

Системний підхід (СП) є важливим періодом у процесі розвитку різних методів пізнання, методів, які тісно пов’язані з дослідницькою та конструкторською функцією, засобів описування та витлумачення природи аналізованих або надумано створюваних предметів. СП – один з особливих засобів наукового розвідку, завдяки якому об’єкт, який досліджують поділяють на окремі частки, що їх аналізують в згуртованості, тобто системно [124]. Це методологічна направленість, основним завданням якого є розробка дослідження та конструювання методів складно впорядкованих об’єктів.

Згідно [125] системний аналіз (СА) - це методологія вивчення порядків, які є в вивченні будь-яких предметів, що представляють собою систему, проведення їх поділення на окремі частки і подальшого аналізу. Вирішальна відзнака СА

полягає в тому, що він складається не тільки з розділення предмета на окремі частки, а і в їх об'єднанні.

Визначальною метою СА є те, що завдяки йому визначаються і усуваються усі другорядні (незначні) питання, а визнаються основні і з них вибирається краще рішення. СА включає низку інших, методів, які залежать від нього та діють у його межах. Метод спрямованого вибору (СВ), який складається з декількох особливих методів дослідження, з яких обирається самий кращий.

Стосовно дослідження якості поверхневих шарів виробів (структури, шорсткості, мікротвердості, товщини зміцненого шару або нанесеного покриття, його суцільності, наявності залишкових напружень тощо) цей метод може мати конкретний вираз.

До методів пізнання відноситься і синтез, і вони, тільки в близькій єдності з аналізом є плідними методами пізнання. Для проведення аналізу предмета потрібно не ділити, безперервне його сприймання, а синтез здійснений тільки тоді, коли виконаний аналіз. Тобто синтез це сполучення розділених при аналізі елементів в одне ціле [126].

Методологія СВ потрібної технології для забезпечення параметрів якості поверхонь деталей обіймає весь його життєвий цикл від гіпотези і конструкторської розробки до утилізації.

Загальна область вирішення окремих задач, пов'язаних з розробкою технології управління якістю робочих поверхонь виробів, визначають предметну галузь методології запропонованої при проведенні дійсного дослідження.

На рис. 2.1 показані взаємозв'язки між двома, з точки зору СП, тісно пов'язані між собою інформаційна і матеріальна сфери життєвого циклу виробу.

При вирішенні оптимізаційних завдань значно підвищується призначення інформаційної сфери, яка може виражатись в окремих законах, різних теоріях та наукових гіпотезах. В інформаційній сфері народжуються і набирають незалежності такі форми, як ідея, проблема тощо [127-129].

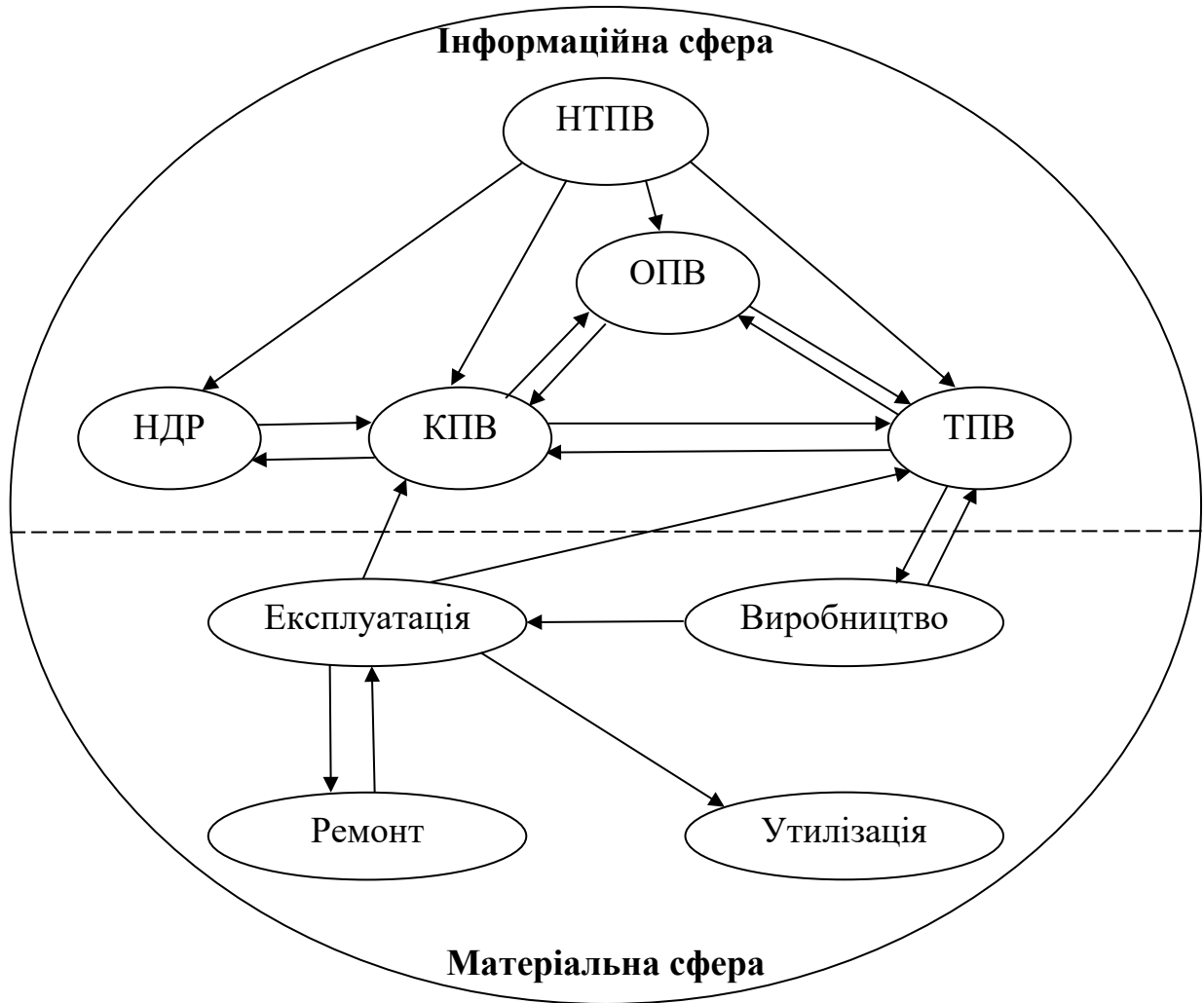


Рисунок 2.1 - Взаємозалежність між інформаційної та матеріальної сферами виготовлення та життя виробів

Якщо при формування необхідної якості поверхневого шару деталі відсутні потрібні закономірності, то виникає потреба в проведенні необхідних і значних експериментальних досліджень для того, щоб здійснити правильний цілеспрямований вибір оптимального технологічного процесу.

Науково-технічна підготовка виробництва (НТПВ) залучає такі стадії:

- розробку і покращення структур виробів – конструкторську підготовку виробництва (КПВ);
- розробку і покращення технологічних процесів – технологічну підготовку виробництва (ТПВ);
- комплектація підприємства оснащенням, виробничими майданчиками, продукцією, спеціалістами тощо – організаційну підготовку виробництва (ОПВ).

В ході проведення КПВ розкривають загальну характеристику і взаємне розташування деталей і вузлів; способи їх сполучення і крім цього випускають набір потрібної документації, а при ТПВ визначають черговість і методи механічної обробки і інших процесів згідно життєвого циклу виробу.

З часом характеристики виробу, як конструкційні, так і технологічні, отримані ще на ранніх стадіях проявляють свої властивості на більш пізніх стадіях, наприклад при експлуатації. В процесі морального змінення стану виробів, виникає необхідність в удосконаленні як їх конструкції, так і технології їх створення. Таким чином існує постійна необхідність в подальшому розвитку НТПП.

Дуже важливим для втілення наукових розробок в життя є науково-дослідна розробка (НДР), яка цілеспрямована на виготовлення нових спеціальних виробів згідно інакших технічних рішень чим попередні і які, як правило, створюються на експериментальних стендах і в лабораторних умовах.

Експлуатація виробу дуже міцно пов'язана з його ремонтом. При правильній експлуатації виробу залежить і збільшується його термін між проведенням потрібних ремонтів.

В дійсний час, при виконанні ремонтних робіт, пов'язаних з відновленням зношених поверхневих шарів виробів, використовуються нові, ефективні і екологічно безпечні технології, завдяки яким новий відновлений шар, при подальшій експлуатації, значно довговічніше чим зношений.

Застосовування системи СВ послідовності забезпечення необхідних параметрів якості поверхонь деталей, які працюють в умовах гідроабразивного зношування, на різних етапах їх життєвого циклу представлена на рис. 2.2.

Слід підкреслити, що результати досліджень, які будуть отримані в дійсній роботі, будуть теж потрібні, коли дійде черга до здійснення складального процесу, коли для необхідного взаємодіяння деталей в машині необхідно, щоб сполучення їх поверхонь, одна відносно іншої, мало конкретний характер: вільно пересуватися; не повинні рухатись, але повинні складатися і розбиратися; лишатися під час експлуатації нерухомими.

Етапи життєвого циклу виробу

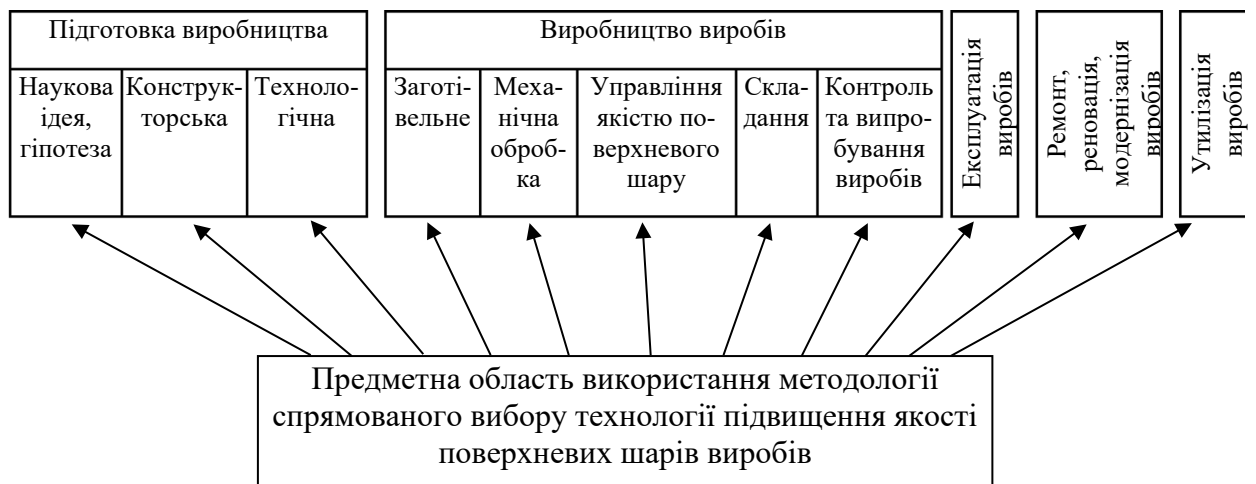


Рисунок 2.2 - Застосовування системи СВ послідовності забезпечення необхідних параметрів якості поверхонь деталей, які працюють в умовах гідроабразивного зношування, на різних етапах їх життєвого циклу

Та чи інша вибрана операція складання в певній мірі буде залежати від параметрів якості отриманого раніше поверхневого шару. Це викликає необхідність проводити більш глибокий аналіз процесу складання, тому, що на останніх етапах обробки деталей остаточно формуються потрібні властивості виробу.

При забезпеченні потрібних параметрів якості поверхневого шару та необхідних експлуатаційних властивостей (механічних, фізико-хімічних, трибологічних тощо) міняються методи їх контролювання. При відповідних знаннях згідно якісного і кількісного складу поверхневого шару деталі та його властивості можна успішно керувати процесом раціональної експлуатації виробу.

Витрати на забезпечення екологічної безпеки виготовлення деталей, працюючих в умовах ГЗ та ЕЗ, потрібно додати до загальних витрат.

2.2. Система управління параметрами якості поверхонь деталей, працюючих в умовах ГЗ і ЕЗ

На рисунках 2.3-2.5 показані окремі деталі і окремі варіанти для вибору технологій, завдяки яким можливе досягнення необхідної якості їх поверхонь і які потребують практичного використання, отриманих в дійсній роботі результатів досліджень.

При цьому досліджували поверхні роторів гвинтових компресорів (ГК), які виготовляються з вуглецевої сталі 50 (рис. 2.3), захисних втулок (ЗВ) масляних ущільнень насосів з нержавіючої корозійностійкої сталі 12Х18Н10Т (рис. 2.4) і корпусу компресора (КК) з високоміцного чавуну ВЧ50 (рис. 2.5).

Як видно з рисунків 2.3-2.6 існує багато технологічних методів, завдяки яким можливо досягнути потрібних параметрів якості поверхонь показаних на рисунках деталей, тому, варіанти переміни стану якості поверхні від одного до іншого має вигляд, згідно рис. 2.7.

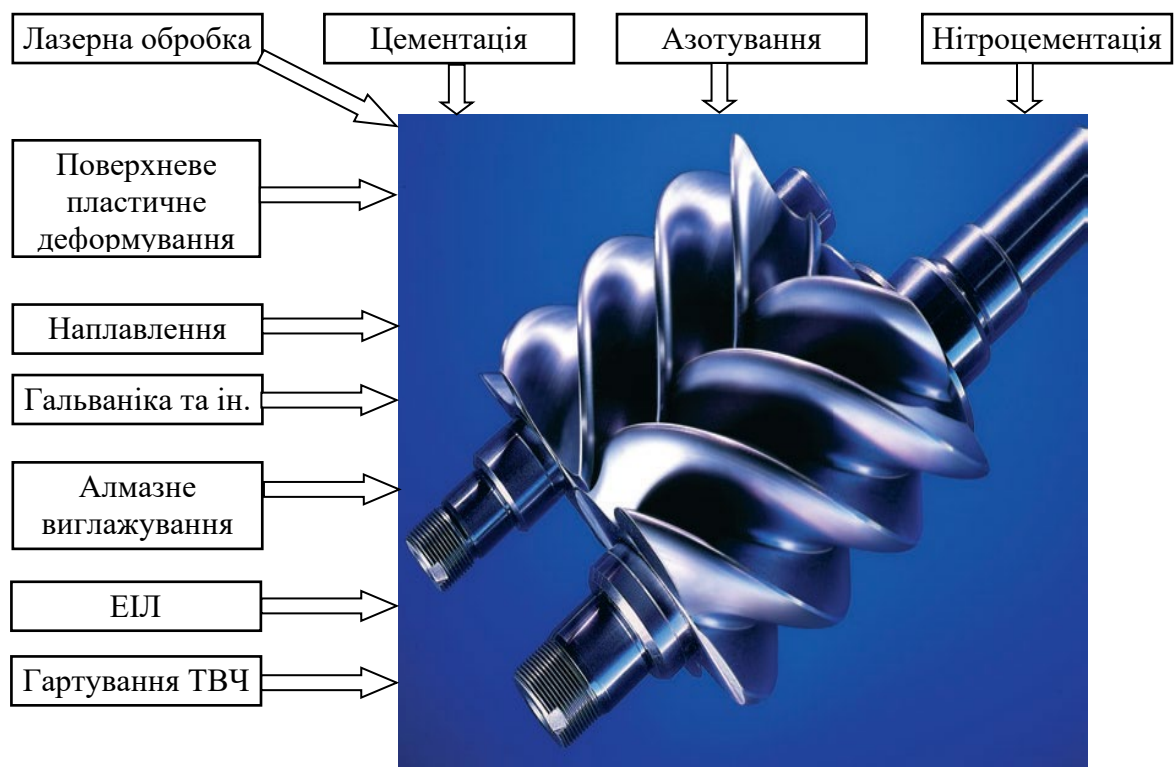


Рисунок 2.3 - Варіанти досягнення потрібних параметрів якості поверхонь роторів гвинтового компресору.

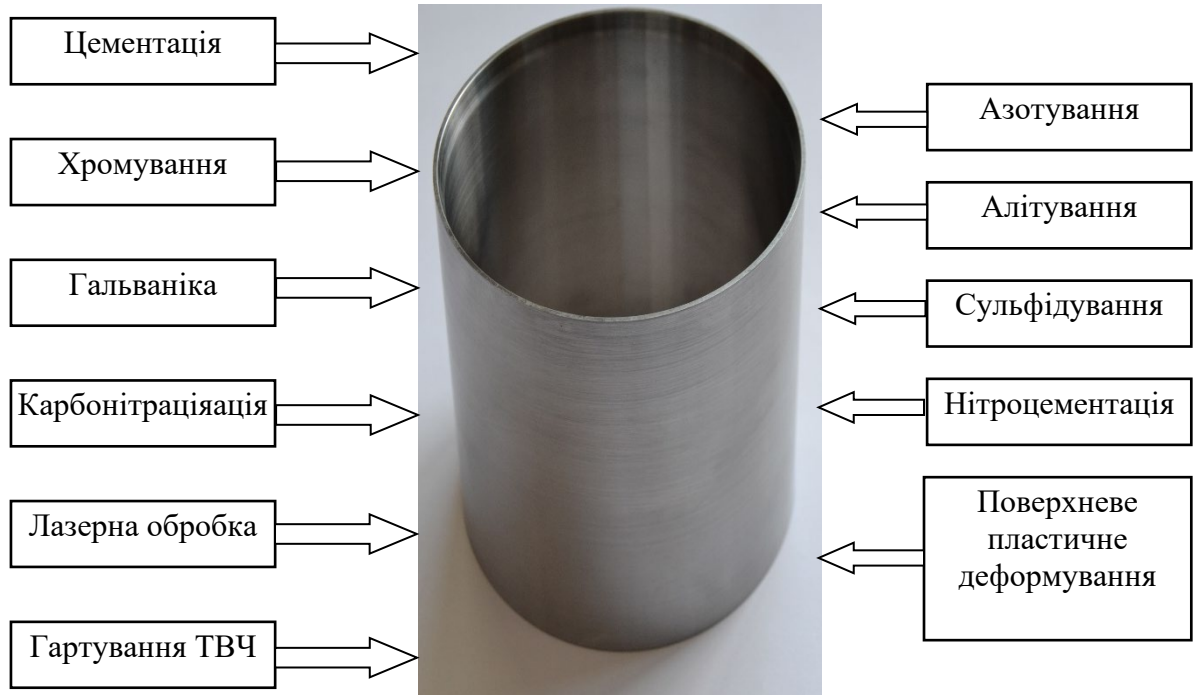


Рисунок 2.4 – Варіанти досягнення потрібних параметрів якості поверхні захисної втулки масляного ущільнення насоса.

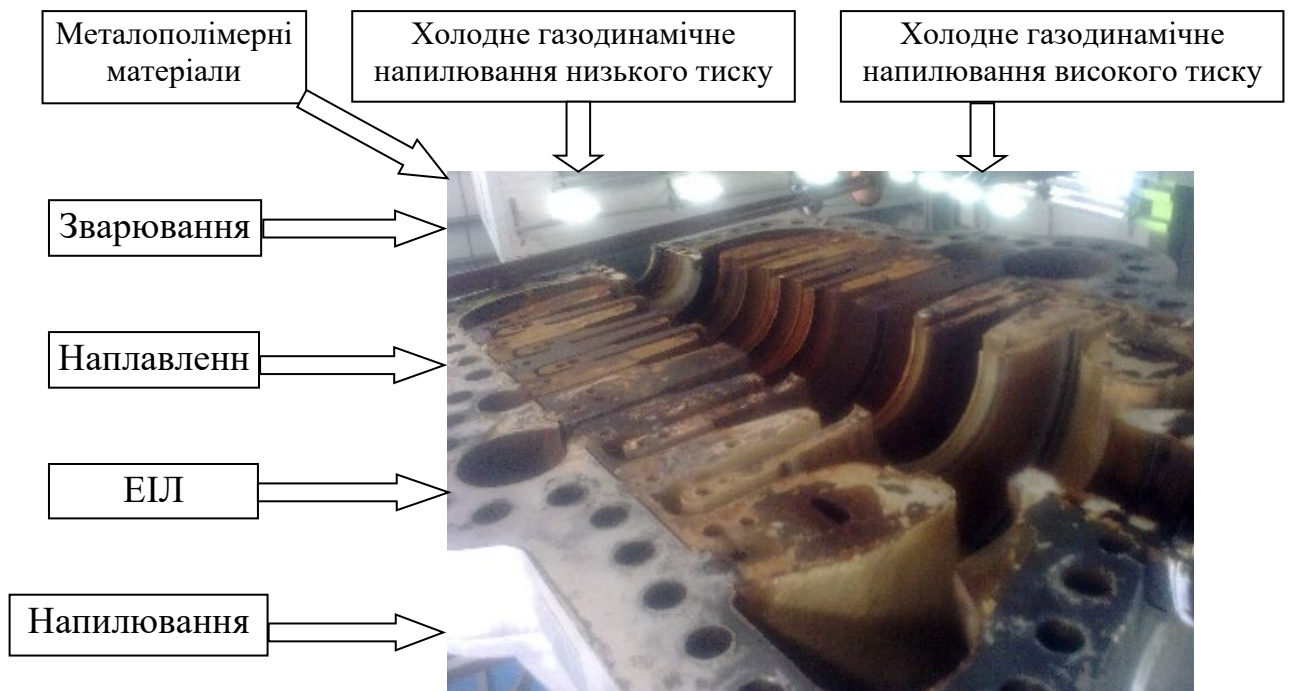


Рисунок 2.5 – Варіанти досягнення потрібних параметрів якості поверхонь корпусу компресора.

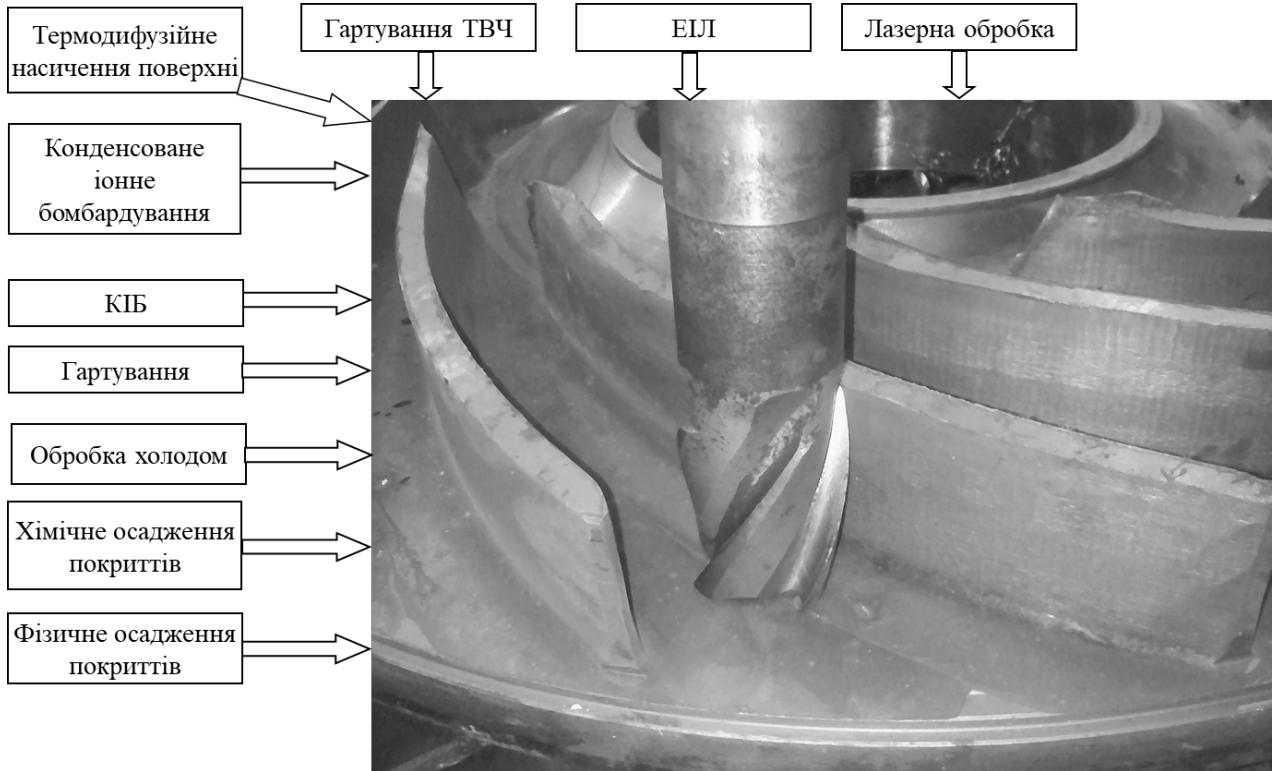


Рисунок 2.6 – Варіанти досягнення потрібних параметрів якості поверхні металорізального інструменту.

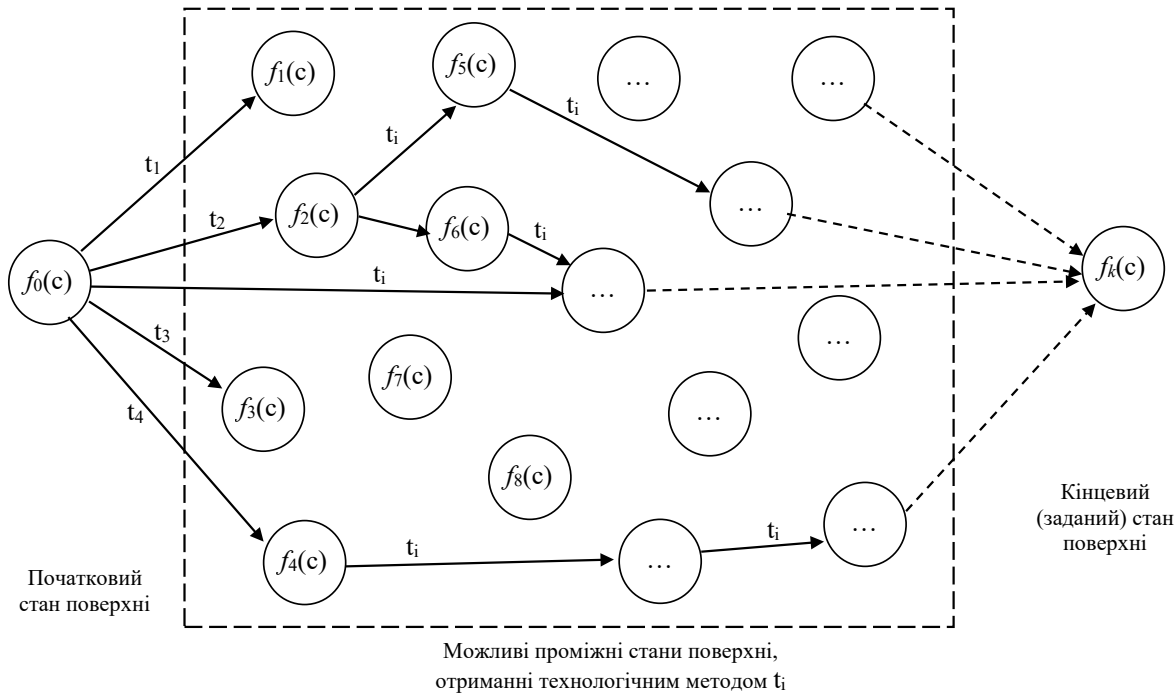


Рисунок 2.7 - Граф зміни якості поверхні виробу від одного стану до іншого

Цільова функція визначає доброякісність управління процесом отримання поверхневим шаром виробу потрібних параметрів якості при застосовуванні

одного з задіяних методів і в потрібному виді задача оптимізації має наступний вигляд [130]:

$$Q' = \text{extr} \{ f_0(x, \omega) | x \in D \};$$

при існуючих обмеженнях

$$g(x, \omega) \leq 0; f(x) \leq 0; a_i \leq x_i \leq b_i,$$

де $f_0(x, \omega)$ - показник оптимізації, який тісно залежить від змінних x і стаціонарних ω параметрів процесу; D – область дозволених значень x ; a_i, b_i – константні.

Оптимізація може бути структурною, коли оптимізуються існуючі технології або кількість нанесених шарів на поверхню виробу, а також параметрична, коли з декількох параметрів існуючої технології обирається оптимальний (найкращий).

Вважаючи те, що при великій кількості параметрів, які різняться тим, що підкоряються тільки особистим законам і розвиваються тільки в певних умовах, при цьому потрібні параметри якості поверхні можуть бути отримані малою кількістю методів, оптимізацію можна провести методом лінійного програмування. При цьому потрібно скласти необхідну мережеву модель допустимих методів (рис. 2.8), кількість яких дозволяє досягти потрібні параметри якості поверхні (рис. 2.9).

Параметри матриці показують скільки методів аналізується. Завдяки ребрам з'єднують методи, завдяки яким може бути отримана поверхня з потрібними параметрами якості.

З початку матриці, знаходиться вершина, що визначає начало «В»(витік) дії методів, а в кінці – вершина, яка показує завершення процесу аналізу методів, що розглядались («С»(стік)) з метою досягнення поверхонь виробу з потрібними параметрами якості. Вироби можуть мати декілька поверхонь (елементів), які потребують різних параметрів якості. Тому кількість задіяних методів для окремих виробів може зрости.

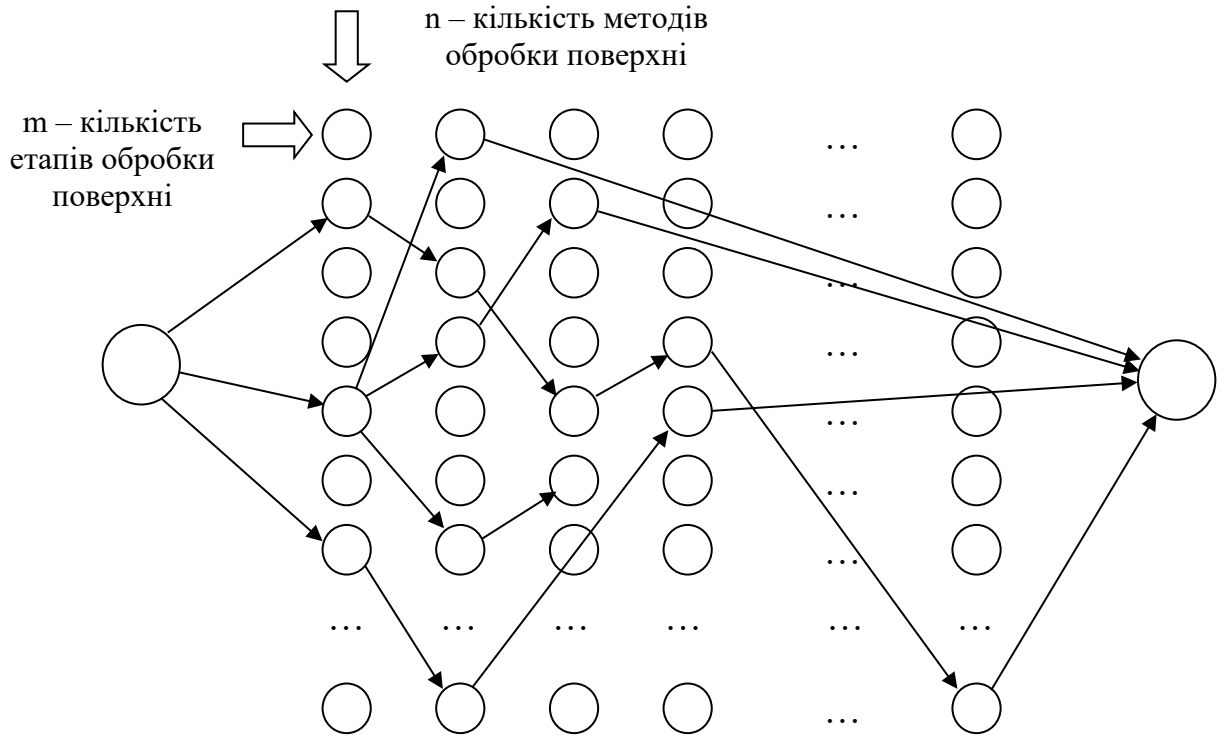


Рисунок 2.8 - Мережева модель існуючих методів, завдяки яким існує можливість отримати необхідні параметри якості поверхні виробу

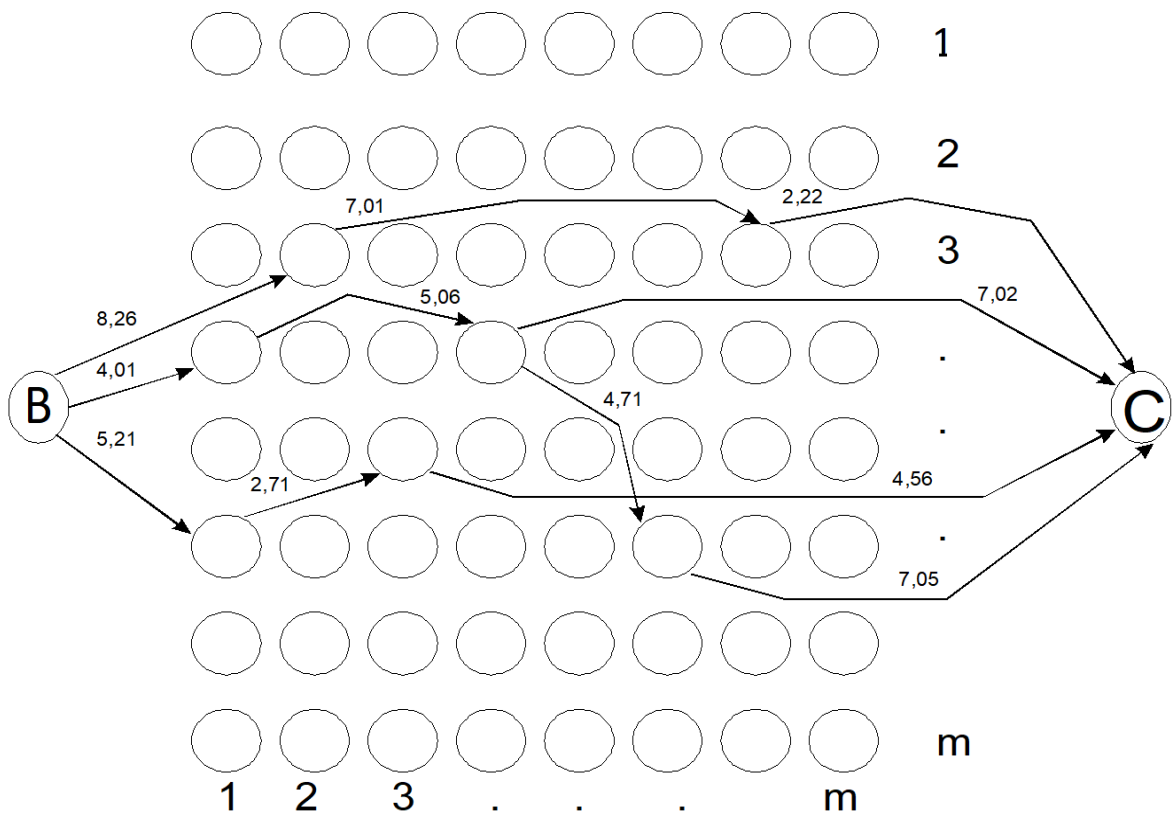


Рисунок 2.9 - Мережева модель існуючих варіантів здобутку потрібних параметрів якості поверхонь виробів

На ребрах матриці є окремі цифри, які позначають наявність вагових коефіцієнтів обраного еталону оптимальності. Шляхом використання стандартних алгоритмів, визначається самий короткий шлях на мережі, який має оптимальну вагу вказаних даних.

Завдання оптимізації сформулюється так:
мінімізувати:

$$\sum_{ji \in \text{мережі}} \sum \Delta R_{ji} \times J_{ji};$$

при обмеженнях:

$$\sum_{kj \in \text{мережі}} \vartheta_{kj} - \sum_{ik \in \text{мережі}} \vartheta_{ik} = \begin{cases} 1, \text{ для } k = П; \\ 0, \text{ для } k = \text{проміжних}; \\ -1, \text{ для } k = К, \end{cases}$$

де $\vartheta_{ji} \geq 0$ для всіх дуг мережі;

k – номер виток і стоку мережі;

kj – витік шляхів з верхівки k у верхівку j ;

ik – у верхівку k стікають шляхи з початкових вершин i .

При оптимізації можлива зміна: якості і кількості методів, задіяних щоб сформувати потрібні параметри якості поверхонь, числа нанесених шарів, параметри обладнання що використовується, а також екологічні властивості методів, що розглядаються.

2.3 Цілеспрямоване обрання доцільної технології безпеки поверхонь деталей, працюючих в умовах гідроабразивного та ерозійного зношування

Аналіз факторів, що впливають на знос поверхонь деталей машин

В процесі роботи, як гідравлічних машин, так і інших, на поверхні деталей яких негативно діють абразивні частки, що знаходяться в потоці рідини (гідроабразивне зношування), так і в результаті дії самої рідини (ерозійне зношування), а також під впливом інших видів зносу: окислювального, корозійного, механічного, кавітаційного, фреттинг корозії тощо деталі поступово

зношуються. При цьому вони змінюють, як свою попередню геометричну форму, так і параметри якості поверхневих шарів та їх властивості.

В залежності від попереднього (вихідного) стану поверхні, залежить можливість деталі чинити опір зношуванню, тобто її експлуатаційні властивості.

В процесі роботи гвинтового компресора (ГК) в основному зношуються посадкові поверхні для кулькових та роликових підшипників, а також назовні кінцівки лопатей гвинтів. Зношування кінцівок лопатей гвинтів зазвичай невелике, не більше 0,2-0,3 мм на діаметр, але навіть воно призводить до великого зменшення ККД компресора, так як первинний зазор між поверхнями буває на рівні 0,02-0,03 мм.

Якщо при роботі ГК мастило знаходиться в горючому стані, і, крім цього, його дуже часто запускають і зупиняють, відбувається значний знос поверхонь гвинтів під підшипники, які також можуть зруйнуватись, тобто можуть завчасно вийти з ладу. В результаті таких поломок може виникнути серйозна аварія, яка завершується заклинюванням назовніх кінцівок лопатей гвинтів і значним їх руйнуванням до 3,0 мм на діаметр. Відновлення зруйнованих поверхонь виконують на спеціалізованих підприємствах або повністю замінюють компресорний блок.

У світовій практиці затвердилася система сервісного обслуговування протягом усього життєвого циклу – від покупки до списання. Сервісне обслуговування роблять спеціалізовані підрозділи фірм-виробників устаткування, розташованих у безпосередній близькості до споживачів.

Наприклад, ВАТ «НВАТ ВНДІкомпресормаш» має три сервісних центри в промислових регіонах України. Для споживачів енергетичного устаткування з'явилася можливість: не просто використовувати у своїй роботі компресорну техніку, а й обслуговувати її на місцях експлуатації, забезпечувати в короткі терміни запасними частинами, відпрацьовувати сучасні технології ремонту й обслуговування техніки, що дозволяє суттєво знизити витрати та в результаті собівартість кінцевої продукції для споживача [131]. Авторами запропонована схема організації технічного супроводу процесів придбання та експлуатації компресорного та енергетичного обладнання, яка за допомогою розподілу

основних завдань учасників цієї схеми дозволяє налагодити тісну взаємовигідну співпрацю між споживачами та заводами-виробниками енергетичного устаткування.

Захисна втулка (ЗВ) є основною деталлю масляного ущільнення від працездатності і надійності якої безпосередньо залежить безпечна та безвідмовна робота всього компресорного агрегату. Пошкодження ущільнювального вузла відбувається внаслідок впливу ряду факторів: режиму роботи, властивості матеріалів герметизованого з'єднання та ущільнювача, допустимої межі витoku, ресурсу, токсичності та хімічній агресивності середовища тиску, температури тощо [132].

Для зміцнення поверхневого шару ЗВ на нього наносять, любим відомим способом, як правило, наплавленням зносостійке покриття з сплаву на базі нікелю - Хастелою [133].

З часом матеріал ЗВ був замінений на пластичну і корозійностійку нержавіючу сталь 12Х18Н10Т, поверхневий шар якої зміцнювався методом електроіскрового легування, а в якості електроду-інструменту використовували графіт. Тобто відбувалось насичення поверхні ЗВ вуглецем. Висока температура, що супроводжує процес ЕІЛ дає підстави стверджувати, при легуванні графітовим електродом відбувається свого роду цементация методом електроіскрового легування (ЦЕІЛ) [134].

Чавунний корпус компресора є ваговою частиною компресорного агрегату, тому що захищає нутрянні деталі та вузли, а також забезпечує продуктивну подачу стисненого повітря. Перевагами чавуну перед іншими матеріалами можуть бути: довговічність, термостійкість, зниження шуму, економічна ефективність і легкість обробки [104].

При роботі компресора, який розташований недалеко від виробництв металургійної та хімічної промисловості в повітрі, що є його сировиною, як правило знаходяться небезпечні речовини: вуглекислий газ, частки (краплі) кислот, різні мілкі абразивні частки, які в сукупності позитивно впливають на механічне та корозійне зношування поверхонь деталей компресорів і апаратів [135].

Таким чином, розглянуті вище пошкодження деталей та вузлів компресорів негативно впливають на його ККД і значно знижують їх ресурс [136].

Ріжучий інструмент може піддаватися адгезійному, абразивному, дифузійному, хімічному, окислювальному та багатьом іншим різновидам зносу, які залежать від умов різання [137].

Слід відмітити, що як при виготовленні, так і під час відновлення деталей, які є предметною галуззю дослідження, їх поверхні піддають різним методам зміцнення і захищають від зношування шляхом нанесення спеціальних покриттів (див. рис. 2.3-2.6). При цьому дуже важливо визначити час коли уже неможливе їх подальше використання (міжремонтний пробіг). Це необхідно як з точки зору виникнення аварії, так і можливості проведення відновлювальних робіт.

На рис. 2.10 представлена залежність вагового зносу $\Delta m_{EЗ.+ГЗ}$ зразків з комбінованими електроіскровими покриттями (ЕІП) нанесеними різними методами (1, 2 і 3) від енергії витраченої на руйнування поверхневого шару E_T . При цьому зразки працюють в умовах нормального (окислювально-механічного) зношування, який усугубляється за рахунок гідроабразивних і гідроерозійних процесів. Слід відмітити, що зносостійкість зразка №1 вище, ніж у зразка №2, а у зразка №3, зносостійкість менше, ніж у зразка №2.

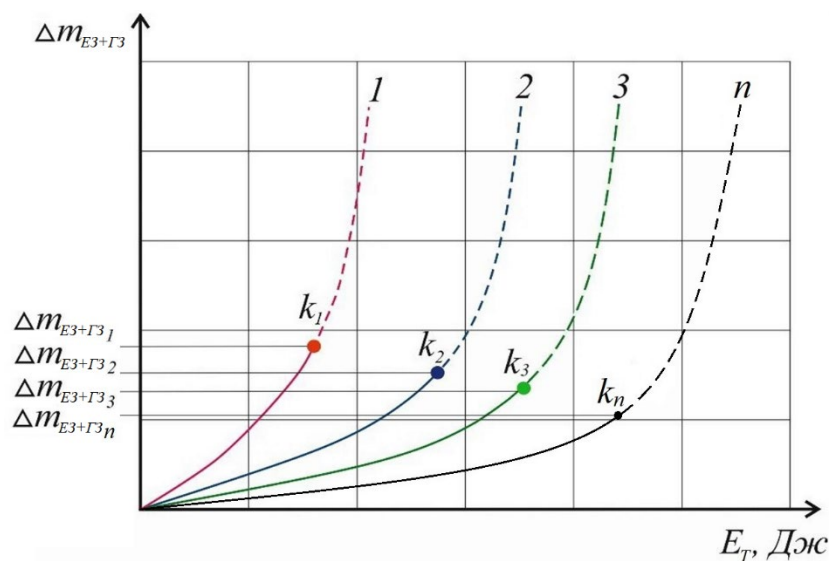


Рисунок 2.10 – Кореляційна залежність вагового зносу $\Delta m_{EЗ.+ГЗ}$ зразків від енергії, витраченої на руйнування поверхневого шару E_T , причому ($U_1 > U_2 > U_3 > U_n$).

При розгляді рис. 2.10 встановлено, що при роботі деталей, зі збільшенням енергії, витраченої на подолання руйнування поверхневого шару, E_T , інтенсивність зношування постійно збільшується. Це можна роз'яснити так, що найвища твердість покриття знаходиться на його поверхні і поступово знижується по мірі поглиблення. Тобто найбільший знос покриття відповідає його найменшій твердості.

Коли нанесене на поверхню деталі покриття зношуються повністю (точки k_1, k_2, k_3 і k_n) і починає зношуватися основа, то процес зношування різко зростає (пунктирна лінія на рис. 2.10) і настає час катастрофічного зношування, коли потрібно машину (обладнання) зупиняти, а цю деталь, після ретельного обстеження, змінювати на нову, або, якщо це можливо, відновлювати найбільш раціональним способом. Продовження роботи приведе до зниження К.К.Д обладнання, або до аварії.

Критерії показників якості поверхонь досліджуваних деталей, що піддаються зносу

Критеріями ознак параметрів якості поверхневих шарів деталей, що нами досліджуються (ротор ГК, ЗВ, КК та РІ), з огляду на умови їх праці, можуть бути застосовані різні критерії. Це: твердість поверхні, навантаження, час до утворення дефектів, межа плинності тощо, які більш підходять до недозволених видів пошкодження поверхневих шарів деталей. Нами в дійсній роботі аналізується процес гідроабразивне і ерозійне зношування, яке усугубляє дію механіко-окисного процесу зносу і методи його зниження та зупинення.

Коли змінюється енергія системи руйнування поверхневого шару, під дією накопиченої енергії, то це викликає у тіла важливі зміни особливостей. Таким чином, може значно помінятися трибологічний стан поверхневого шару (коефіцієнт тертя, шорсткість, суцільність покриття, залишкові напруги, утомлена міцність тощо).

Таким чином, основними при аналізі різних технологій підвищення якості поверхні деталей, працюючих в умовах нормального окислювально-механічного

виду зношення, посиленого дією гідроабразивним і гідроерозійним зносом, повинні бути енергетичні та економічні критерії.

Щоб оцінити зносостійкість поверхонь деталей потрібно використовувати енергетичні критерії, тому що в цьому випадку є можливість оцінити всі параметри, що впливають на знос. Враховуючи, що завдяки навантаженню, яке діє на поверхню деталі при зношуванні, в поверхневому шарі останній відбуваються зміни властивостей поверхневих шарів, то за еталон зносу можна прийняти енергію активації процесу зносу.

Щоб отримати правдиву інформацію про цей чи інший спосіб підвищення якості поверхневого шару деталей (роторів ГК, ЗВ і КК, РІ), потрібно розробити математичну модель (рівняння зносу), яке буде показувати залежність параметрів зносу від енергетичних параметрів обладнання.

Енергія активації процесу зносу E_A розглядається як різниця $E_{ЗВ} - E_D$, де $E_{ЗВ}$ - енергія зв'язку між атомами; E_D - енергія деформації, витраченої на руйнування зв'язку.

При зростанні величини енергії, яка витрачена на знищення покриття (E_T), знос зростає тим дужче, чим більша енергія активації E_A .

Аналізуючи експериментальну залежність (рис. 2.11) вагового зносу Δm_{EZ+GZ} від енергії деформації, витраченої на руйнування зв'язку E_T^{-1} , можна визначити, що Δm_{EZ+GZ} пропорційна $(-E_T)^{-1}$ і величині E_A , (рис. 2.12) тобто:

$$\ln \Delta m_{EZ+GZ} \sim (-E_T)^{-1}, E_A \quad (2.1)$$

Змінюючи наближену рівність на точну

$$\Delta m_{EZ+GZ} = C \cdot e^{\frac{-E_A}{E_T}} \quad (2.2)$$

де $C = \Delta m_{EZ+GZH}$ - знос насичення - максимальний знос при ерозійному і гідроабразивному зношуванні.

Звідси

$$\Delta m_{EZ+GZ} = \Delta m_{EZ+GZH} \cdot e^{\frac{-E_A}{E_T}} \quad (2.3)$$

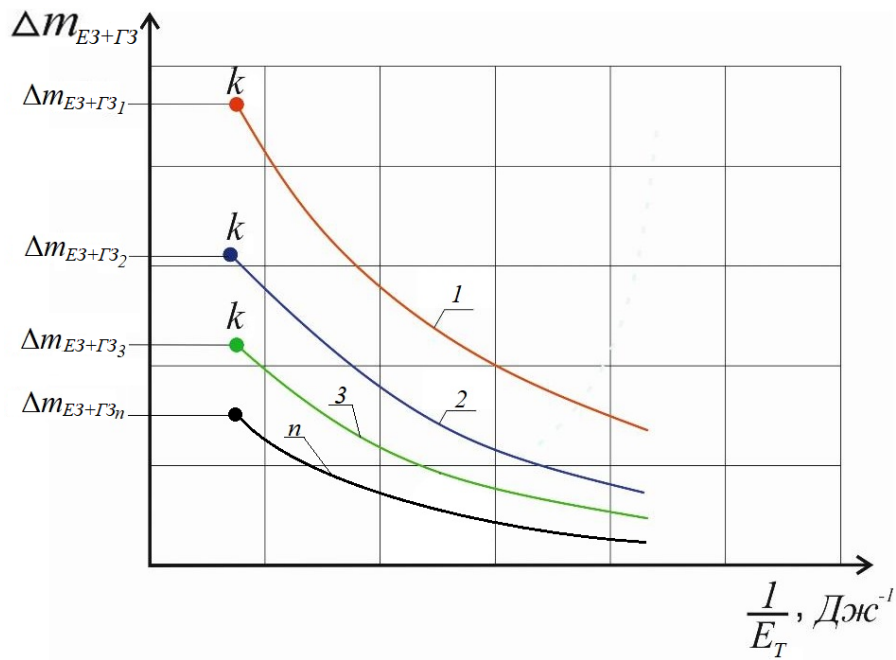


Рисунок 2.11 – Залежність $\Delta m_{E3+\Gamma3}$ зразків $1/E_T$.

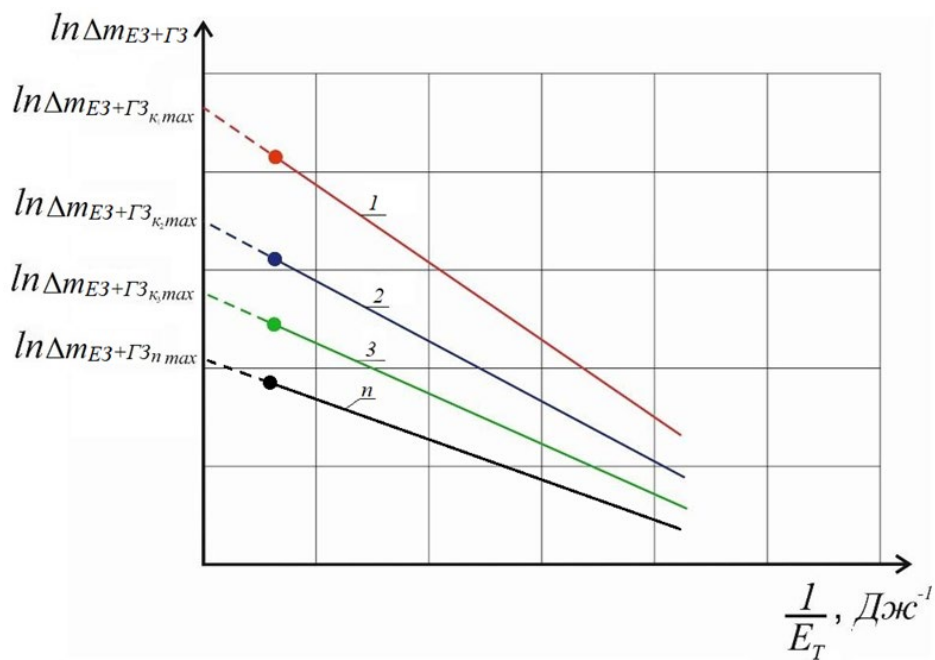


Рисунок 2.12 – Залежність $\ln \Delta m_{E3+\Gamma3}$ зразків від $1/E_T$.

Рівняння (2.3) будимо вважати рівнянням вагового зносу при ерозійному і гідроабразивному зношуванні покриттів.

Прирівнюючи у формулі (2.3)

$$E_A = E_T, \quad (2.4)$$

маємо:

$$\frac{\Delta m_{E3+ГЗ}}{\Delta m_{E3+ГЗ H}} = e^{-1} \quad (2.5)$$

Звідси E_A - це фізична величина, яка дорівнює енергії витраченій на руйнування покриття, при якій $\Delta m_{E3+ГЗ} = \frac{\Delta m_{E3+ГЗ H}}{e}$, тобто $\Delta m_{H3+ГЗ}$ в e разів менше $\Delta m_{H3+ГЗ H}$. Назвемо її константою рівняння зносу. Її розмірність $[E_A] = \text{Дж}$.

Якщо рівняння вагового зносу (2.3) записати у вигляді (2.6) то можна перейти від вагового зносу до лінійного

$$\Delta h_{E3+ГЗ} \cdot S \cdot r = \Delta h_{E3+ГЗ H} \cdot S \cdot r_{E3+ГЗ H} \cdot e^{\frac{-E_A}{E_T}}, \quad (2.6)$$

де S – площа зруйнованої поверхні,

r, r_H – відповідно щільність поверхневого шару під час сталого зношування і в період настання зносу насичення,

$\Delta h_{E3+ГЗ H}$ – величина лінійного зносу насичення при ерозійному і гідроабразивному зношуванні

Після перетворень маємо

$$\Delta h = \Delta h_{E3+ГЗ H} \cdot \frac{r_{E3+ГЗ H}}{r} \cdot e^{\frac{-E_A}{E_T}}, \quad (2.7)$$

Залежність (2.7) назвемо рівнянням лінійного зносу при ерозійному і гідроабразивному зношуванні.

Слід відмітити, що в рівнянні (2.7) потрібно враховувати зміну щільності шару по глибині.

Якщо підставим в (2.7) співвідношення (2.4), отримаємо:

$$\Delta h_{E3+ГЗ H} = \Delta h_{E3+ГЗ H} \cdot \frac{r_{E3+ГЗ H}}{r} \cdot e^{-1} \quad (2.8)$$

Тоді

$$\frac{\Delta h_{E3+\Gamma3} \cdot r}{\Delta h_{E3+\Gamma3 H} \cdot r_{E3+\Gamma3 H}} = e^{-1} \quad (2.9)$$

що співпадає з (2.5).

Отже, E_A - це фізична величина, яка рівняється енергії витраченій на руйнування покриття, при якій $\Delta h_{E3+\Gamma3} \cdot r_{E3+\Gamma3}$ в e разів менше

$$\Delta h_{E3+\Gamma3 H} \cdot r_{E3+\Gamma3 H}. \text{ Слід зазначити, що при } r_{E3+\Gamma3 H} = r_{E3+\Gamma3}, \frac{\Delta h_{E3+\Gamma3}}{\Delta h_{E3+\Gamma3 H}} = e^{-1}.$$

Величину енергії потрібну для здійснення зносу певної кількості речовини ($\Delta m_{E3+\Gamma3 x}$) або для отримання необхідного лінійного зносу ($\Delta h_{E3+\Gamma3 x}$), можна визначити з рівнянь (2.3) і (2.7).

Тоді відповідно:

$$E_T = \frac{E_A}{\ln \frac{\Delta m_{E3+\Gamma3 H}}{\Delta m_{E3+\Gamma3 x}}}; \quad (2.10)$$

$$E'_T = \frac{E_A}{\ln \frac{\Delta h_{E3+\Gamma3 H} \cdot r_{E3+\Gamma3 H}}{\Delta h_{E3+\Gamma3 x} \cdot r_{E3+\Gamma3 x}}}. \quad (2.11)$$

Розроблювання алгоритму для отримання величини критеріїв рівняння зносу

У загальному вигляді алгоритм розрахунку величини критеріїв рівняння зносу має наступний вигляд:

1. Завдяки експериментам визначається ваговій $\Delta m_{E3+\Gamma3}$ і лінійний $\Delta h_{E3+\Gamma3}$ знос в залежності від різних значень, енергії витраченої на руйнування покриття $(E_T)^{-1}$.

2. Будуються графіки залежності $\ln (\Delta m_{E3+\Gamma3})$ і $\ln (\Delta h_{E3+\Gamma3})$ від $(E_T)^{-1}$.

3. Знаходиться енергія активації (E_A), як $E_A = \operatorname{tg} \alpha$, де α - кут нахилу прямих залежностей $\ln(\Delta m_{E3+\Gamma3})$ і $\ln(\Delta h_{E3+\Gamma3})$ від $(E_T)^{-1}$.

4. За відрізком, який відсікається на осі ординат прямою, екстрапольованою до значення абсциси $E_T^{-1}=0$ ($\ln(\Delta m_{E3+\Gamma3})=\ln(\Delta m_{h(E3+\Gamma3)})$ і $\ln(\Delta h_{E3+\Gamma3})=\ln(\Delta h_{h(E3+\Gamma3)})$ при $(E_T)^{-1}\rightarrow 0$), визначається найбільший ваговий і лінійний знос, відповідно $\Delta m_{h(E3+\Gamma3)}$ та $\Delta h_{h(E3+\Gamma3)}$.

5. Згідно (2.10) і (2.11) знаходимо енергію витрачену на зношування певної кількості речовини (Δm_x) або для досягнення величини потрібного лінійного зносу (Δh_x):

$$E_T = \frac{E_A}{\ln \frac{\Delta m_{E3+\Gamma3 H}}{\Delta m_{E3+\Gamma3 x}}} ; \quad E'_T = \frac{E_A}{\ln \frac{\Delta h_{E3+\Gamma3 H} \cdot r_{E3+\Gamma3 H}}{\Delta h_{E3+\Gamma3 x} \cdot r_{E3+\Gamma3 x}}} .$$

Таким чином, завдяки отриманим залежностям (1-11) можна знаходити енергію, яка витрачається на руйнування певної кількості покриття, або зміцненого шару, E_T або навпаки, по відомій енергії E_T визначати величину, зношеного покриття, або зміцненого шару. В результаті з'являється можливість обирати потрібні режими експлуатації виробу або формувати на поверхнях деталей потрібні захисні покриття.

Завдяки запропонованій математичній моделі - рівняння вагового та лінійного зносу, з'являється перспектива правдоподібно передбачати величину зносу поверхневого шару, який сформований в той чи інший спосіб. Крім цього визначення констант рівняння зносу (енергії активації процесу зношування, E_A і максимально допустимого зносу) дозволяє визначати найбільш доцільні технології підвищення параметрів якості поверхневих шарів досліджуваних нами деталей, тобто можуть призначатися критеріями для вибору потрібних технологій.

В результаті проведення технологічними службами спрямованого вибору найбільш раціональної технології захисту поверхневих шарів деталей, працюючих в умовах гідроабразивного чи іншого виду зношування з'являється можливість гарантовано прогнозувати термін її роботи до заміни на іншу. Це дозволяє робітникам служби Головного механіка своєчасно підготувати заміну

зношеної деталі на нову або відремонтовану, що дає можливість працювати підприємству без аварійних зупинок і нести значні, пов'язані з цим, економічні збитки.

Логічну схему спрямованого вибору технологій досягненні заданих параметрів якості виробів можна представити блок-схемою рис. 2.13.

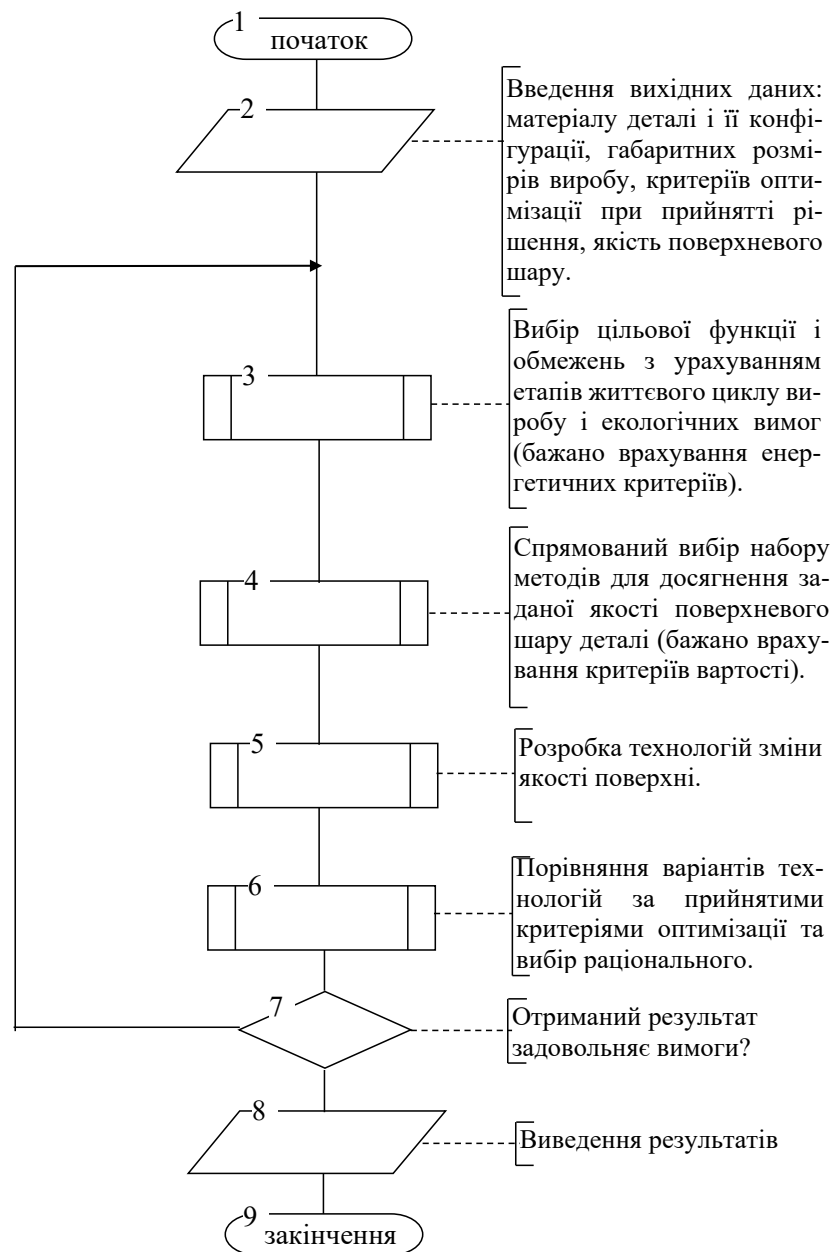


Рисунок 2.13 - Алгоритм цілеспрямованого визначення потрібної технологій покращення параметрів якості поверхонь деталей машин, що працюють в умовах ГЗ і ЕЗ.

2.4 Висновки по розділу 2

1. В результаті проведених досліджень запропонована методика знаходження оптимального варіанта технології виготовлення та відновленню деталей машин, що працюють в умовах ГЗ і ЕЗ. При цьому будь-який з розглянутих варіантів реалізується з використанням економічних і екологічних показників.

2. Запропонована система цілеспрямованого вибору екологічно нешкідливої технології виготовлення і реновації відповідальних деталей машин, які працюють при гідроабразивному і ерозійному зносі.

3. В наслідку розгляду чинників, від яких залежить знос, сформованих методом ЕІЛ поверхонь покриттів, досліджуваних відповідальних деталей машин, встановлено, що зі збільшенням енергії, витраченої на руйнування покриття їх контактуючих робочих поверхонь, ефективність зношування збільшується, що пов'язано з розподілом твердості покриття по глибині.

4. При повному зносі захисного електроіскрового покриття (ЕІП) інтенсивність зношування різко зростає, що позначається на зниженні ККД працюючого обладнання.

5. В результаті проведених експериментальних досліджень встановлені кореляційні залежності вагового, Δm_{EZ+GZ} і лінійного Δh_{EZ+GZ} зносу досліджуваних відповідальних деталей машин, від енергії, використаної на зношення їх поверхні E_T . В першому наближенні вони нагадують експоненційно зростаючі залежності.

6. Одержано рівняння зношення поверхневих шарів деталей та розроблений алгоритм для знаходження його констант (найбільшого вагового $\Delta m_{n(EZ+GZ)}$ і лінійного зносу $\Delta h_{n(EZ+GZ)}$, а також енергії активації процесу зносу E_A).

7. Розроблено методику, завдяки якій можливо працівникам ремонтних служб підприємства визначати термін для проведення ремонтних робіт.

8. По матеріалам розділу опубліковані наступні наукові роботи [144].

РОЗДІЛ 3

ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, ПРАЦЮЮЧИХ В УМОВАХ ГІДРОАБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ

3.1. Особливості структурного стану поверхонь сталейних деталей з зносостійкими покриттями складу 1М і 90% ВК6+10%1М, нанесеними методом ЕІЛ з використанням СТНС

3.1.1. Методика досліджень

Для дослідження структури та вимірювання мікротвердості поверхневого шару використовували шліфи зразків сталі 45 і Р6М5 розміром 10×10×8.

Середньовуглецева нелегована сталь 45 застосовувалася для досліджень у поліпшеному стані з твердістю основи 280НВ та сорбітною структурою.

Швидкорізальна сталь Р6М5 – це високо- і складно легована сталь, де сума легуючих елементів сягає 16 - 18%. Вона містить у собі такі легуючі елементи, як вольфрам, молібден, хром, ванадій. Твердість зразків після остаточної термообробки становила до 64 HRC.

Електроіскрове легування зразків відбувалося з енергією розряду і з продуктивністю згідно табл. 3.1 на установці з ручним вібратором "Елітрон-52А" (рис. 3.1).

Таблиця 3.1 - Залежність продуктивності ЕЕЛ від енергії розряду

Енергія розряду (W_p), Дж	0,52	1,3	2,6
Продуктивність, $\text{см}^2/\text{хв}$	1,0	1,5	2,0

В якості електродів-інструментів використовували ніхромовий дріт Х20Н80 Ø3мм і пластини, розміром 2×3×30 мм з твердого сплаву ВК6.

При ЕІЛ електродами з ніхромового дроту Х20Н80 на зразки попередньо наносили СТНС, згідно 2-х варіантів:

1-й складу: 5% Si+ 5% В+90% вазелін;

2-й складу: 0,5% Si+0,5% В+59% ВК6+40% вазелін.



Рисунок 3.1 – Фотографія установки для ЕІЛ моделі «Елітрон-52А»

При ЕІЛ електродами з твердого сплаву ВК6 на зразки попередньо наносили СТНС складу: 0,5% Si+0,5% B+2% Cr+7% Ni+90 % вазелін.

Порошки для СТНС в необхідній кількості ретельно перемішували з вазеліном і наносили на поверхню зразків. Після цього не чекаючи висихання проводили ЕІЛ.

При металографічних дослідженнях поверхня шліфу була орієнтована перпендикулярно поверхні легування (рис. 3.2). Перед виготовленням шліфу для виключення крайового ефекту при легуванні торець зразка фрезерували на глибину не менше 2 мм. Для попередження зминання шару, завалів краю зразок кріпили з контртілом у струбціні. Для виявлення структури шліф зазнавав хімічного травлення у реактиві.

Після виготовлення шліфи досліджували на оптичному мікроскопі «Неофот-2», де проводилася оцінка якості шару, його суцільності, товщини та будови зон підшару – дифузної зони та зони термічного впливу. Також проводився дюрOMETричний аналіз на розподіл мікротвердості у поверхневому шарі та по глибині шліфу від поверхні. Вимірювання мікротвердості проводили на мікротвердомірі ПМТ-3 вдавленням алмазної піраміди під навантаженням 0,05 Н.

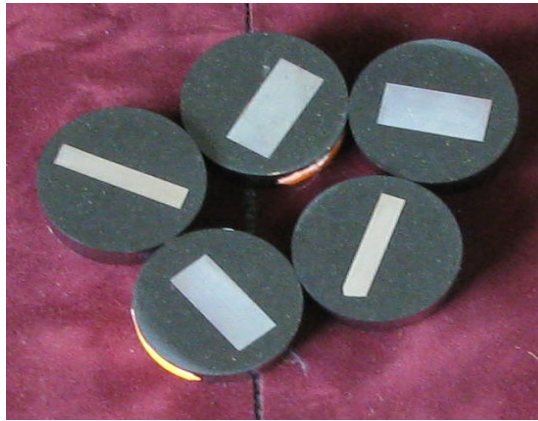


Рисунок 3.2 – Фотографія шліфів для металографічних досліджень.

Шорсткість вимірювали на приладі профілограф-профілометр мод. 201 заводу «Калібр» шляхом зняття та обробки профілограм (рис. 3.3).



Рисунок 3.3 – Фотографія виміру шорсткості покриття на профілографі-профілометрі мод. 201.

3.1.2. Результати досліджень

Серед розглянутих в розділі 1 методів відновлення деталей великої уваги заслуговує електроіскрове легування, яке є екологічно безпечним й останнім часом все частіше використовують при їх виготовленні і в ремонтному виробництві. При цьому, особливої уваги заслуговують технології, коли електродом-інструментом (ЕІ) є композиційні зносостійкі матеріали, отримані за допомогою порошкової металургії (ПМ), що складаються з тонкодисперсної суміші 1М (70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% B) та ВК6. Найбільш ефективним є ЕІЛ,

коли ЕІ має склад 90% ВК6 + 10% 1М. Використання ЕІ з таким складом дозволяє наносити захисні зносостійкі покриття з мікротвердістю до 14200 МПа. Також, з літературних джерел відомо, що на підприємствах, обладнання яких працює в умовах радіаційного опромінювання, при виготовленні і відновленні деталей виробів не допускається використання кобальту, який при опроміненні стає джерелом небезпечних довгоживучих ізотопів (див. розд. 1).

Таким чином, представляє як науковий, так і практичний інтерес дослідити параметри якості і властивості поверхневих шарів, сформованих при легуванні ЕІ складу 90% ВК6 + 10%1М, в склад яких входить кобальт і 1М (70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% В) де кобальт відсутній. Ці дослідження можуть бути корисними для захисту поверхневих шарів деталей, як в загальному машинобудуванні, так і на виробництвах, де може відбуватись радіаційне опромінювання.

На наш погляд, технологію нанесення зносостійких покриттів методом ЕІЛ, з використанням ЕІ складу 1М і 90% ВК6 + 10%1М, що виготовляють ПМ, можна удосконалити за рахунок використання СТНС, які попередньо наносяться на поверхню деталі що легується. Так, для одержання покриття складу 1М, можна в якості компактного ЕІ використовувати ніхромовий дріт Х20Н80, а в якості СТНС кремній (Si) і бор (В). Для одержання покриття складу 90% ВК6 + 10%1М існує два варіанти:

1-й – коли в якості компактного електроду інструменту використовують ЕІ з твердого сплаву ВК6, а в якості СТНС - порошок нікелю (Ni), хрому (Cr), кремнію і бору;

2-й коли в якості компактного ЕІ використовувати ніхромовий дріт Х20Н80, а в якості СТНС порошок твердого сплаву ВК6, кремнію і бору.

Для дослідження структури та вимірювання мікротвердості поверхневого шару використовували шліфи зразків сталі 45 і Р6М5 (рис. 3.3).

Електроіскрове легування зразків відбувалося з енергією розряду $W_p=0,52$; 1,3 і 2,6 Дж і з продуктивністю, (Q), відповідно Q=1,0; 1,5; і 2,0 см²/хв на установці з ручним вібратором "Елітрон-52А". Більш детально методика досліджень представлена вище.

На рис. 3.4 зображені ділянки структури поверхневого шару зразка сталі 45 (*а* і *б*) і сталі Р6М5 (*в* і *г*) після ЕІЛ ЕІ, виготовленим шляхом ПМ з матеріалу 90% ВК6 + 10%1М (*а*, *в*) і 1М (*б*, *г*) з енергією розряду, $W_p = 0,42$ Дж і продуктивністю $1,0 \text{ см}^2/\text{хв}$.

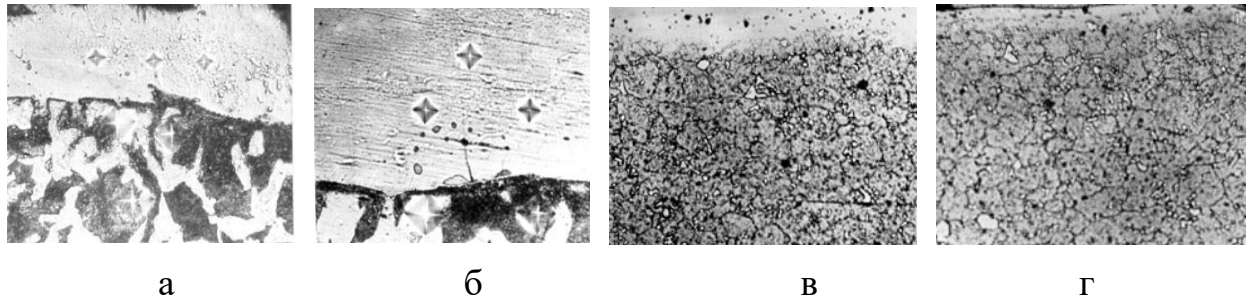


Рисунок 3.4 – Мікроструктури поверхневого шару зразка сталі 45 (*а* і *б*) і Р6М5 (*в* і *г*) після ЕІЛ ЕІ, виготовленим шляхом ПМ з матеріалу 90% ВК6 + 10%1М (*а* і *в*) і 1М (*б* і *г*), х 400.

Аналіз структур показує, що поверхневі шари сталей 45 і швидкорізальної сталі Р6М5 з покриттями, нанесеними методом ЕІЛ, традиційно, по мірі поглиблення, складаються з трьох ділянок: «білий шар», перехідна зона і основний метал.

На рис. 3.5 (*а*, *б*, *в*) показані мікроструктури поверхневого шару сталі 45 після ЕІЛ ЕІ з ніхрому марки Х20Н80 з використанням СТНС складу (5% Si+5% В+90% вазелін), а також розподіл мікротвердості по глибині поверхневого шару при $W_p = 0,52$; 1,30; і 2,60 Дж.

На рис. 3.6 (*а*, *б*, *в*) показані мікроструктури поверхневого шару сталі 45 після ЕІЛ ЕІ з ніхрому марки Х20Н80 з використанням СТНС складу (0,5% Si+0,5% В +59% ВК6+40% вазелін), а також розподіл мікротвердості по глибині поверхневого шару, відповідно графіки 1; 2 і 3 при $W_p = 0,52$; 1,30; і 2,60 Дж.

На рис. 3.7 (*а*, *б*, *в*) показані мікроструктури поверхневого шару сталі 45 після ЕІЛ ЕІ з твердого сплаву ВК6 з використанням СТНС складу (0,5% Si+0,5% В +2% Cr+7%Ni+90% вазелін), а також розподіл мікротвердості по глибині поверхневого шару відповідно (графіки 1; 2 і 3) при $W_p = 0,52$; 1,30; і 2,60 Дж.

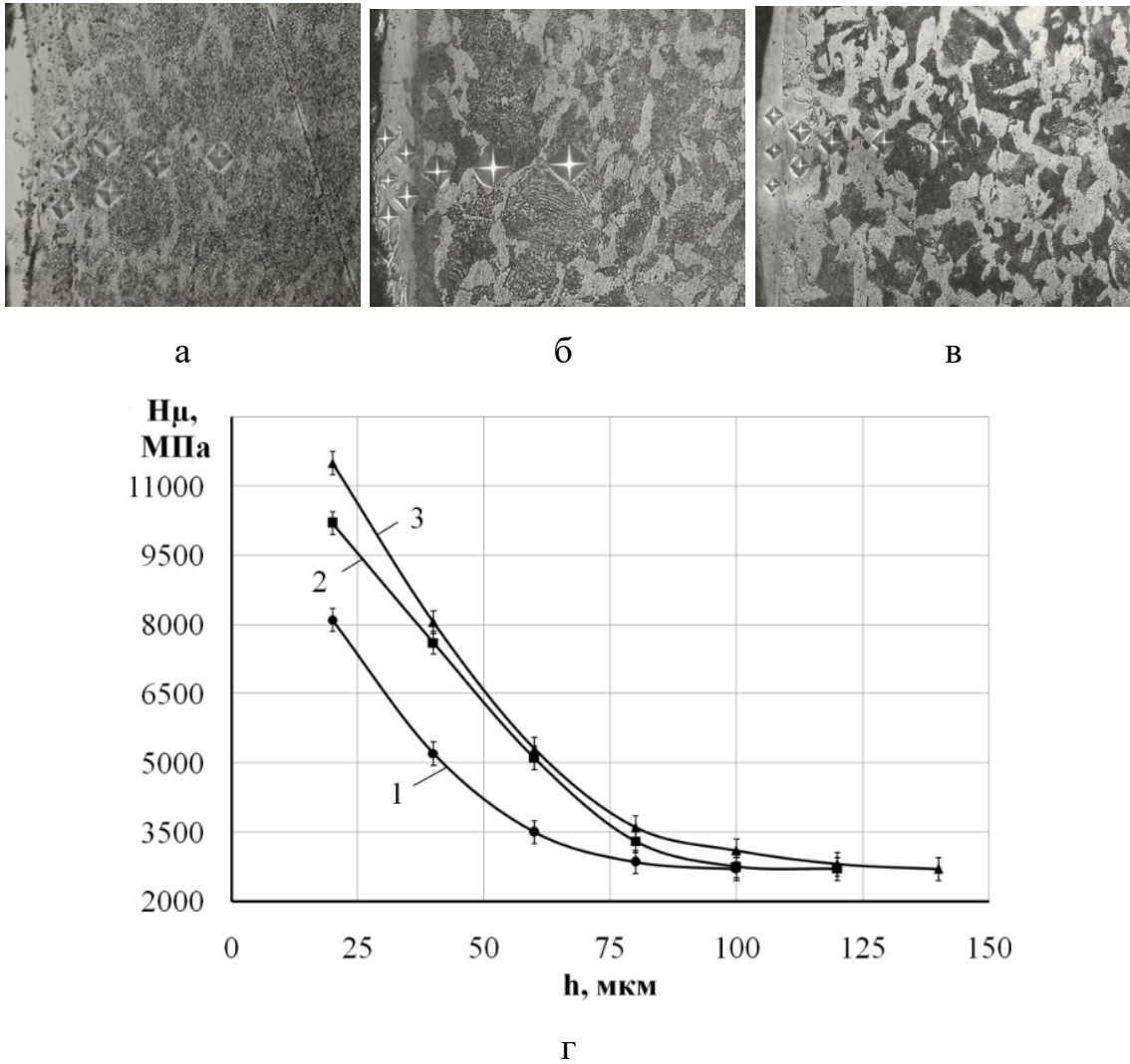


Рисунок 3.5 –Мікроструктури (а, б, в) і розподіл мікротвердості по глибині поверхневого шару сталі 45 після ЕІЛ ЕІ з ніхрому Х20Н80 з використанням СТНС, відповідно графіки 1; 2 і 3 при $W_p = 0,52$; $1,30$; і $2,60$ Дж х 400.

В таблицях 3.2 і 3.3, відповідно, представлені результати розподілу мікротвердості в поверхневому шарі сталі 45 при вимірі з кроком ~ 20 мкм, по мірі поглиблення з поверхні і параметри якості: товщина і найбільша мікротвердість «білого шару» і перехідної (дифузійної) зони, а також шорсткість поверхні і суцільність нанесеного покриття.

Аналіз мікроструктур (рисунки 3.5-3.7), розподілу мікротвердості (табл. 3.2) і параметрів якості поверхневого шару зразків сталі 45 (табл. 3.3) після ЕІЛ при енергіях розряду 0,52; 1,3 і 2,6 Дж і продуктивності, відповідно 1,0; 1,5 і 2,0 $\text{см}^2/\text{хв}$ ЕІ, виготовленими з ніхрому Х20Н80 і твердого сплаву ВК6 з

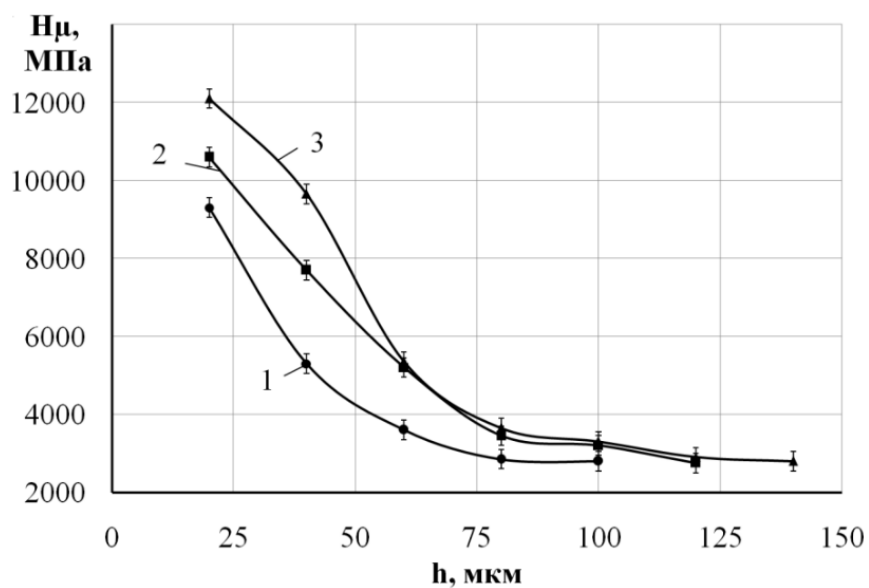
використанням СТНС показав, що покриття, по мірі поглиблення, складаються з трьох ділянок: «білий шар», перехідна зона і основний метал.



а

б

в



Г

Рисунок 3.6 –Мікроструктури (а, б, в) і розподіл мікротвердості по глибині поверхневого шару сталі 45 після ЕІЛ ЕІ з ніхрому Х20Н80 з використанням СТНС, відповідно графіки 1; 2 і 3 при $W_p = 0,52; 1,30; \text{ і } 2,60$ Дж, $x 400$.

Мікротвердість на ділянках, які максимально ближче до поверхні, по міру поглиблення повільно зменшується і переходить в мікротвердість основного металу (див. табл. 3.2). При цьому, при збільшенні енергії розряду зростають товщина «білого шару» і перехідної зони, а також мікротвердість і шорсткість поверхні, але суцільність зменшується (див. табл. 3.3).

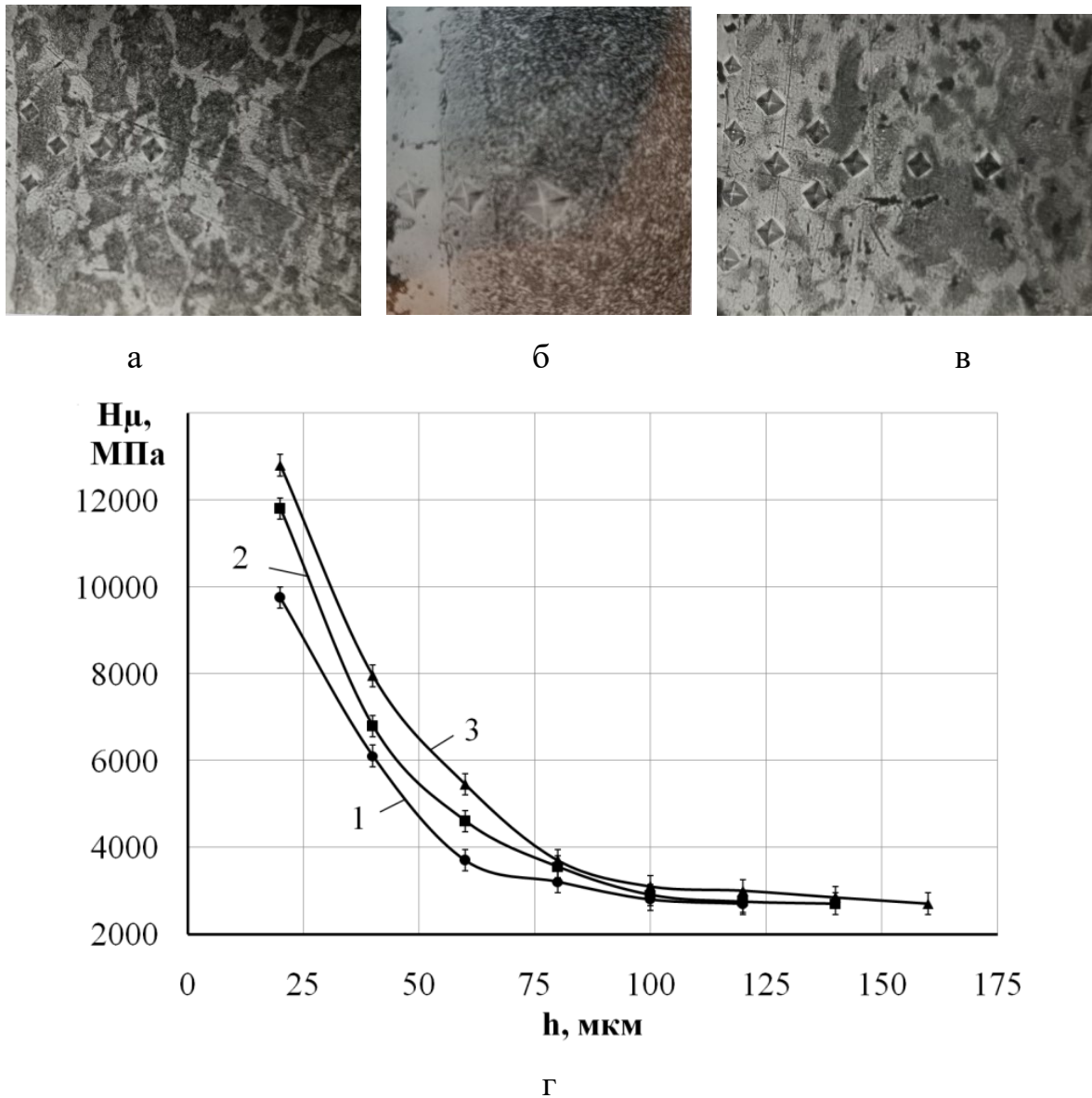


Рисунок 3.7 – Мікроструктури (а, б, в) і розподіл мікротвердості по глибині поверхневого шару сталі 45 після ЕІЛ ЕІ з твердого сплаву ВК6 з використанням СТНС, відповідно графіки 1; 2 і 3 при $W_p = 0,52; 1,30; \text{ і } 2,60$ Дж $\times 400$.

На рис. 3.8 а, б, в показані мікроструктури поверхневого шару сталі Р6М5 після ЕІЛ ЕІ з ніхромового дроту марки Х20Н80 з використанням СТНС складу (5% Si+ 5% В+90% вазелін), а також розподіл мікротвердості по глибині поверхневого шару при $W_p = 0,52; 1,30; \text{ і } 2,60$ Дж.

Таблиця 3.2 - Результати дюрOMETричного аналізу поверхневих шарів сталі 45

Енергія розряду Дж	Продуктивність, см ² /хв	Розподіл мікротвердості (H _μ) в поверхневому шарі при кроку вимірювання~20 мкм.							
		20	40	60	80	100	120	140	160
ЕІЛ ніхром Х20Н80; СТНС: 5% Si+ 5% В+90% вазелін									
0,52	1,0	8100±20	5200±20	3500±20	2850±20				
1,30	1,5	10200±20	7600±50	5100±50	3300±50	2750±50			
2,60	2,0	11500±50	8050±50	5300±50	3600±50	3100±50	2800±50		
ЕІЛ ніхром Х20Н80; СТНС: 0,5% Si+0,5% В+59% ВК6+40% вазелін.									
0,52	1,0	9300±20	5300±50	3600±50	2850±50	2800±50			
1,30	1,5	10600±20	7700±50	5200±50	3450±50	3200±50	2750±50		
2,60	2,0	12 100±20	9650±50	5350±50	3650±50	3300±50	2900±50	2800±50	
ЕІЛ ВК6									
0,52	1,0	9750±20	6100±50	3700±50	3200±50	2800±50			
1,30	1,5	11800±20	6700±50	5300±50	3550±50	2900±50	2750±50		
2,60	2,0	12800±20	6800±50	5450±50	3700±50	3100±50	3000±50	2850±50	

На рис. 3.9 а, б, в показані мікроструктури поверхневого шару Р6М5 після ЕІЛ ЕІ з ніхромового дроту марки Х20Н80 з використанням СТНС складу (0,5% Si+0,5% В +59% ВК6+40% вазелін), а також розподіл мікротвердості по глибині поверхневого шару, відповідно (графіки 1; 2 і 3) при W_p = 0,52; 1,30; і 2,60 Дж.

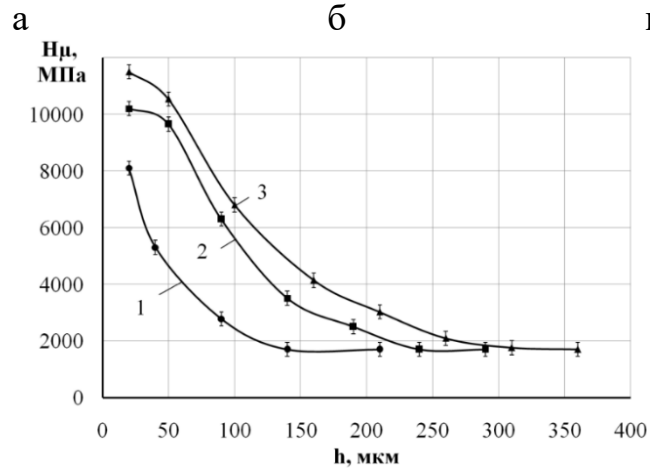
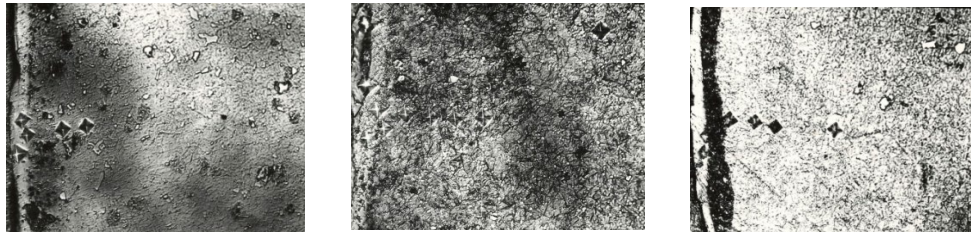
На рис. 3.10 а, б, в показані мікроструктури поверхневого шару Р6М5 після ЕІЛ ЕІ з твердого сплаву ВК6 з використанням СТНС складу (0,5% Si+0,5%В +2%Cr+7%Ni+90% вазелін), а також розподіл мікротвердості по глибині поверхневого шару, відповідно (графіки 1; 2 і 3) при енергіях розряду, W_p = 0,52; 1,30; і 2,60 Дж.

Таблиця 3.3 – Параметри якості поверхневих шарів сталі 45 після ЕІЛ ЕІ 1М та (90%ВК6 + 10%1М), виготовленими методом ПМ, а також з ніхрому Х20Н80 і твердого сплаву ВК6 з використанням СТНС

Енергія розряду, Дж	Продуктивність, см ² /хв	Склад спеціального технологічного середовища	Товщина, мкм		Максимальна ммікротвер- дість, МПа		Шорсткість, Ra, мкм	Суцільність покриття, %
			«білого» шару	перехідної зони	«білого» шару	перехідної зони		
ЕІЛ 1М*								
0,42	1,0	-	До 55	20-30	8350	5500	3,1	60
ЕІЛ (90%ВК6 + 10%1М)*								
0,42	1,0	-	До 30	20-30	14200	7500	3,2	80
ЕІЛ ніхром Х20Н80								
0,52	1,0	5% Si+ 5% В+90% вазелін	20	30	8100	5200	3,5	90
1,30	1,5	5% Si+ 5% В+90% вазелін	35	40	10200	6 300	4,3	80
2,60	2,0	5% Si+ 5% В+90% вазелін	50	50	11500	6800	6,1	70
ЕІЛ ніхром Х20Н80								
0,52	1,0	0,5% Si+0,5% В+59% ВК6+40% вазелін	20	35	9300	5600	3,5	90
1,30	1,5	0,5% Si+0,5% В+59% ВК6+40% вазелін	40	45	10600	6400	4,7	80
2,60	2,0	0,5% Si+0,5% В+59% ВК6+40% вазелін	60	55	12100	6800	6,5	70
ЕІЛ ВК6								
0,52	1,0	0,5% Si+0,5% В+2% Cr+7% Ni+90 % вазелін	35	45	9750	6100	3,3	95
1,30	1,5	0,5%Si+0,5%B+2%Cr+ 7% Ni+90% вазелін	50	55	11800	6700	4,2	85
2,60	2,0	0,5%Si+0,5%B+2%Cr+ 7% Ni+90% вазелін	65	70	12800	6800	5,9	70

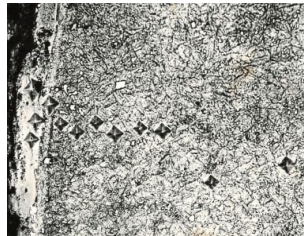
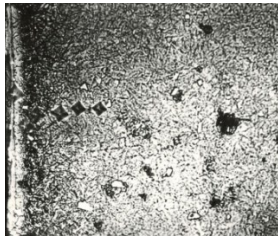
*- електроди – інструменти, виготовлені методом ПМ.

В таблицях 3.4 і 3.5, відповідно, представлені результати розподілу мікротвердості в поверхневому шарі сталі Р6М5 при вимірі з кроком ~ 20 мкм, по мірі поглиблення з поверхні і параметри якості: товщина і найбільша мікротвердість «білого шару» і перехідної (дифузійної) зони, а також шорсткість поверхні і суцільність нанесеного покриття.



Г

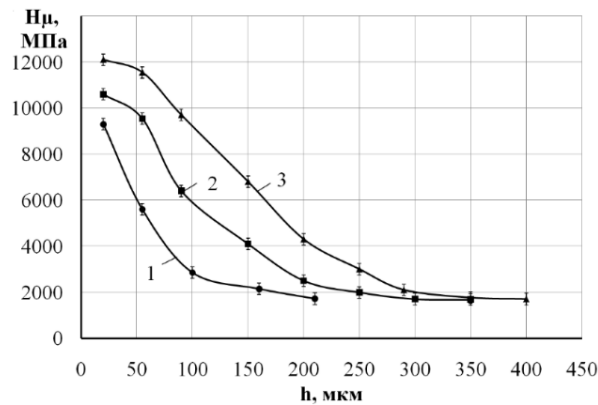
Рисунок 3.8 – Мікроструктури (а, б, в) і розподіл мікротвердості по глибині поверхневого шару сталі Р6М5 після ЕІЛ ЕІ з ніхрому Х20Н80 з використанням СТНС, відповідно (графіки 1; 2 і 3) при $W_p = 0,52; 1,30; \text{ і } 2,60 \text{ Дж} \times 400$.



а

б

в



Г

Рисунок 3.9 – Мікроструктури (а, б, в) і розподіл мікротвердості по глибині поверхневого шару Р6М5 після ЕІЛ ЕІ з ніхрому Х20Н80 з використанням СТНС, відповідно графіки 1; 2 і 3 при $W_p = 0,52; 1,30; \text{ і } 2,60 \text{ Дж}, \times 400$.

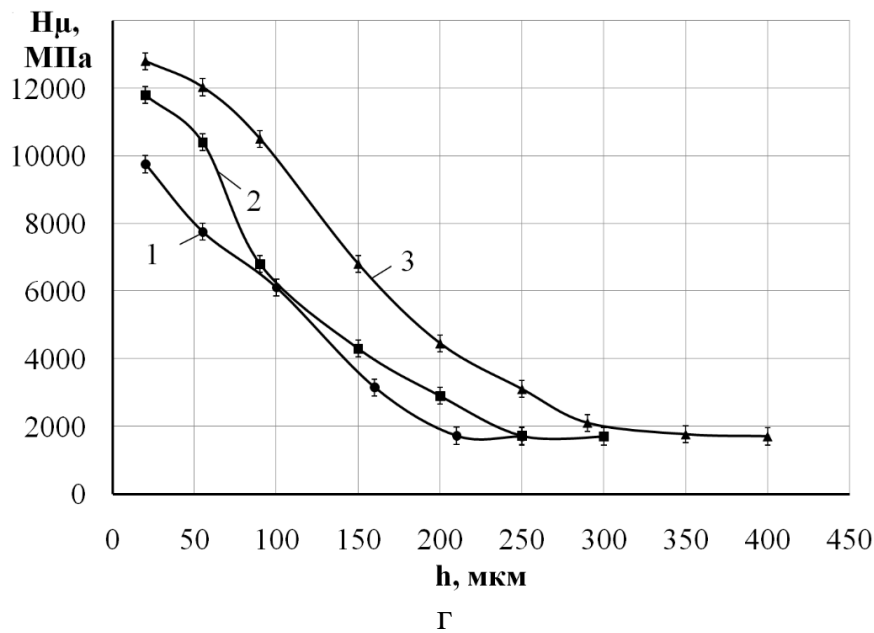
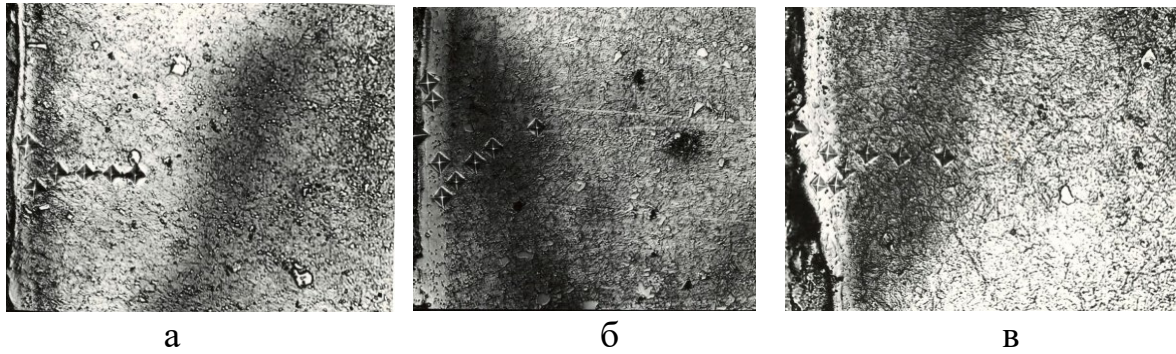


Рисунок 3.10 – Мікроструктури (а, б, в) і розподіл мікротвердості по глибині поверхневого шару сталі Р6М5 після ЕІЛ ЕІ з твердого сплаву ВК6 з використанням СТНС, відповідно графіки 1; 2 і 3 при $W_p = 0,52; 1,30; \text{і } 2,60$ Дж, $\times 400$.

Аналіз мікроструктур (рисунки 3.8-3.10), розподілу мікротвердості (табл. 3.4) і параметрів якості поверхневого шару зразків сталі Р6М5 (табл. 3.5) після ЕІЛ при енергіях розряду 0,52; 1,3 і 2,6 Дж і продуктивності, відповідно 1,0; 1,5 і 2,0 $\text{см}^2/\text{хв}$ ЕІ, виготовленими з ніхром Х20Н80 і твердого сплаву ВК6, з використанням СТНС, показав що покриття, по мірі поглиблення, складаються з трьох ділянок: «білий шар», перехідна зона і основний метал.

Таблиця 3.4 - Результати дюрOMETричного аналізу поверхневих шарів сталі

Р6М5

Енергія розряду, Дж	Продуктивність, см ² /хв	Розподіл мікротвердості (Н _μ) в поверхневому шарі при кроку вимірювання ~20 мкм.							
		20	40	60	80	100	120	140	160
ЕІЛ ніхром Х20Н80									
0,52	1,0	12500±20	8200±50	3000±50	2750±50				
1,30	1,5	12800±20	8600±50	6100±50	3300±50	2800±50			
2,60	2,0	13300±50	9050±50	6300±50	3500±50	3000±50	2800±50		
ЕІЛ ніхром Х20Н80									
0,52	1,0	12600±20	8300±50	3500±50	3050±50	2800±50			
1,30	1,5	12900±20	8800±50	6200±50	3400±50	3000±50	2750±50		
2,60	2,0	13500±20	9850±50	6350±50	3650±50	3200±50	2900±50	2800±50	
ЕІЛ ВК6									
0,52	1,0	14250±20	8450±50	3550±50	3200±50	2800±50			
1,30	1,5	14400±20	9700±50	6300±50	3550±50	2900±50	2750±50		
2,60	2,0	14600±20	9950±50	6550±50	3700±50	3200±50	3000±50	2850±50	

Мікротвердість, яка максимальна ближче до поверхні, по міру поглиблення повільно зменшується і переходить в мікротвердість основного металу (див. табл. 3.4). При цьому, при збільшенні енергії розряду зростають товщина «білого шару» і перехідної зони, а також мікротвердість і шорсткість поверхні, але суцільність зменшується (див. табл. 3.5).

Таблиця 3.5 – Параметри якості поверхневих шарів сталі Р6М5 після ЕІЛ ЕІ: 1М, (90%ВК6 + 10%1М), а також з ніхрому Х20Н80 і твердого сплаву ВК6 з використанням СТНС

Енергія розряду, Дж	Продуктивність, см²/хв	Склад спеціального технологічного середовища	Товщина, мкм		Максимальна ммікротвердість, МПа		Шорсткість, Ra, мкм	Суцільність покриття, %
			«білого» шару	перехідної зони	«білого» шару	перехідної зони		
ЕІЛ 1М*								
0,42	1,0	-	До 40	20-30	11500	7500	3,3	90
ЕІЛ (90%ВК6 + 10%1М)*								
0,42	1,0	-	До 25	20	14200	8500	3,1	85
ЕІЛ ніхром Х20Н80								
0,52	1,0	5% Si+ 5% В+90% вазелін	20	30	12500	8200	2,8	90
1,30	1,5	5% Si+ 5% В+90% вазелін	35	40	12800	8300	3,7	85
2,60	2,0	5% Si+ 5% В+90% вазелін	50	50	13300	8550	5,3	80
ЕІЛ ніхром Х20Н80								
0,52	1,0	0,5% Si+0,5% В+59% ВК6+40% вазелін	20	35	12600	8300	3,0	90
1,30	1,5	0,5% Si+0,5% В+59% ВК6+40% вазелін	40	45	12900	8800	4,1	85
2,60	2,0	0,5% Si+0,5% В+59% ВК6+40% вазелін	60	55	13500	8900	5,7	80
ЕІЛ ВК6								
0,52	1,0	0,5% Si+0,5% В+2% Cr+ 7% Ni+90 % вазелін	35	45	14250	8450	3,1	90
1,30	1,5	0,5%Si+0,5%B+2%Cr+ 7% Ni+90% вазелін	50	55	14400	8900	4,2	85
2,60	2,0	0,5%Si+0,5%B+2%Cr+ 7% Ni+90% вазелін	65	70	14600	10150	5,9	80

*- електроди – інструменти, виготовлені методом порошкової металургії.

Таким чином, в результаті проведених досліджень:

- розроблений новий спосіб формування захисних покриттів сталей, що працюють в умовах абразивного зношування, як в загальному машинобудуванні, складу 90% ВК6+10%1М, так і на виробництвах де може бути радіаційне опромінювання - 1М (70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% В), шляхом їх нанесення методом ЕІЛ компактними електродами-інструментами з ніхромового дроту Х20Н80 і твердого сплаву ВК6 та використання спеціальних технологічних середовищ, в склад яких входять необхідні легуючі елементи;
- поверхневі шари сталі 45 і Р6М5 після нанесення зносостійких покриттів мають структуру, яка складається з трьох ділянок: зверху «білий шар», нижче перехідна зона і основний метал. При збільшенні енергії розряду зростають товщина «білого шару» і перехідної зони, а також мікротвердість і шорсткість поверхні, але суцільність зменшується;
- найвища мікротвердість 9750-12800 і 14250-14600 МПа належить покриттям сформованим, відповідно, на сталі 45 і Р6М5 при ЕІЛ компактними ЕІ з твердого сплаву ВК6 і СТНС складу 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7% Ni+90% вазелін.

3.2. Особливості структурного стану поверхонь чавунних деталей з зносостійкими покриттями складу 1М і 90% ВК6+10%1М, сформованими ЕІ, виготовленими ПМ і ЕІЛ з використанням СТНС

3.2.1. Методика досліджень

При дослідженні закономірностей при формуванні електроіскрових покриттів першорядне значення має вивчення характерних особливостей масопереносу, тобто кількості перенесеної речовини з аноду (легуючого електроду-інструменту) на катод (зразок або деталь).

В якості катоду при дослідженні масопереносу використовували зразки з високоміцного чавуну ВЧ 50 розміром 10×10×8 мм і шліфовані до Ra=0,5 мкм. Анодом були компактні ЕІ, виготовлені спіканням методом порошкової

металургії складу: 90% ВК6 + 10% 1М) і 1М - 70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% В. Також використовували компактні ЕІ з твердого сплаву ВК6 і ніхромового дроту марки Х20Н80, при використанні яких на зразки попередньо наносили спеціальні технологічні насичуючі середовища (СТНС) складу, відповідно, 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90 вазелін і 5%Si+5%B+90% вазелін.

ЕІЛ зразків проводили циклічним легуванням (1 цикл = 0,5 хв.) на установці моделі «Елітрон-52А» з ручним вібратором протягом до 2,5 хв. Зразки і ЕІ зважували до ЕІЛ і потім через кожні 0,5 хв. на аналітичних вагах марки «ВЛА-200» з точністю до 10^{-4} знаку. ЕІЛ проводили при енергіях розряду: 0,55; 1,3; 2,6 і 3,4 Дж.

Для проведення металографічних досліджень виготовляли шліфи, які досліджували на оптичному мікроскопі "Неофот-2" та растровому електронному мікроскопі-аналізаторі "РЕМ – 106 І" ВАТ SELMI, де проводилася оцінка якості шару, його суцільності, товщини та будови зон підшару - дифузійної зони. Одночасно проводився дюрOMETричний аналіз на розподіл мікротвердості в поверхневому шарі і по глибині шліфу від поверхні. Вимірювання мікротвердості проводили на мікротвердомірі ПМТ-3 вдавленням алмазної піраміди під навантаженням 0,05 Н, згідно з ГОСТ 9450-76.

На всіх етапах обробки вимірювалася шорсткість поверхні на приладі профілограф-профілометр мод. 201 заводу "Калібр". Результати фіксували за допомогою спеціальної приставки.

Після ЕІЛ для підвищення параметрів якості поверхневих шарів (зниження шорсткості покриттів, підвищення суцільності і втомної міцності, зміни характеру залишкових напружень з розтягуючих на стискаючи) використовували безабразивну ультразвукову фінішну обробку (БУФО).

Для дослідження розподілу елементів по глибині шару проводився локальний мікрорентгеноспектральний аналіз на растровому електронному мікроскопі «РЕМ-106 І» Сумського ВАТ SELMI, що дозволяє формувати зображення об'єкта шляхом сканування його поверхні електронним зондом (діаметром до 5-10 нм) при різних збільшеннях.

Для дослідження впливу методу ЕІЛ на механічні властивості деталі (межу міцності, межу текучості, відносне подовження та відносне звуження) були виготовлені зразки із високоміцного чавуну ВЧ 50, відповідно до ГОСТ 7855-84. Для кожного матеріалу електроду-інструменту і режиму ЕІЛ виготовляли по 3 зразки.

3.2.2. Результати досліджень

Чавунні деталі займають дуже велику нішу в виробництві машин, що працюють в різних галузях господарства України. Вони в порівнянні з деталями, виготовленими з різних марок сталей, мають декілька менші механічні властивості, утім вони краще обробляються різанням, мають суттєво кращу зносостійкість і антифрикційність тощо.

ВЧ з кулястим графітом серед усіх чавунів займають дуже важливе місце, що пояснюється поєднанням їх технологічних, експлуатаційних та економічних властивостей. Завдяки цим корисним особливостям вони широко застосовуються в сучасному машинобудуванні і при їх зміцненні і відновленні все більш використовують технології ЕІЛ (див. розд. 1).

Таким чином, виникає як науковий, так і практичний інтерес дослідити особливості масопереносу при формуванні структури і топографії захисних покриттів, складу (90% ВК6 + 10% 1М) та 1М, сформованих на поверхнях з ВЧ методом ЕІЛ, який би підвищив здатність поверхневого шару чинити опір зношуванню, гарантував би надійність і довговічність їх роботи в агресивних середовищах, був би екологічно безпечним і скоротив витрати на їх виготовлення.

При дослідженні закономірностей при формуванні електроіскрових покриттів першорядне значення має вивчення характерних особливостей масопереносу, тобто кількості перенесеної речовини з аноду (легуючого ЕІ) на катод (зразок або деталь).

В якості катоду при дослідженні масопереносу використовували зразки з високоміцного чавуну ВЧ 50 розміром 10x10x8 мм і шліфовані до $Ra=0,5$ мкм. Анодом були компактні ЕІ, виготовлені спіканням методом ПМ, складу: 90%ВК6 + 10%1М) і 1М - 70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% B, ЕІ з твердого сплаву ВК6 і

ніхромового дроту марки Х20Н80, при використанні яких на зразки попередньо наносили СТНС складу, відповідно, $0,5\%Si+0,5\%B+2\%Cr+7\%Ni+90$ вазелін і $5\%Si+5\%B+90\%$ вазелін.

ЕІЛ зразків проводили циклічним легуванням (1 цикл = 0,5 хв.) на установці моделі «Елітрон-52А» з ручним вібратором протягом до 2,5 хв. Зразки і ЕІ зважували до ЕІЛ і потім через кожні 0,5 хв. на аналітичних вагах марки «ВЛА-200» з точністю до 10^{-4} знаку. ЕІЛ проводили при енергіях розряду: $W_p = 0,55; 1,3; 2,6$ і $3,4$ Дж і з продуктивністю, $Q = 1,0; 1,5; 2,0$ і $2,5$ $cm^2/хв.$ Більш детально методика досліджень представлена в розділі 3.

Дослідження масопереносу

В табл. 3.6 і на рисунках 3.11 і 3.12 представлені результати досліджень динаміки масопереносу матеріалу аноду складу: $90\% BK6 + 10\% 1M$) і $1M$ на поверхневі шари зразків з чавуну ВЧ 50 без попереднього нанесення покриттів з СТНС (рис. 3.11) і з СТНС (рис. 3.12), а також шорсткість і суцільність сформованих покриттів.

В результаті аналізу табл. 3.6 і рисунків 3.11 і 3.12 встановлено:

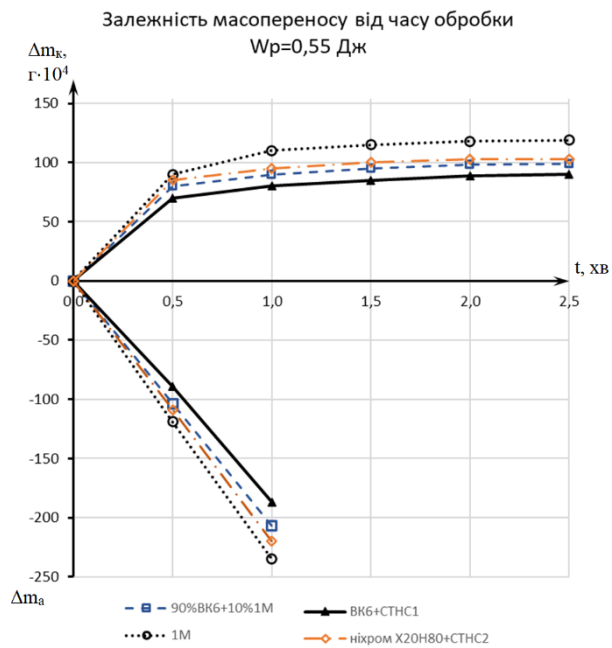
- зі збільшенням часу ЕІЛ збільшується кількість перенесеного матеріалу, з аноду, (Δm_a) на катод, (Δm_k), а шорсткість і суцільність практично не змінюється;
- найбільша кількість матеріалу, що визначається коефіцієнтом масопереносу (k_m), переноситься з початку процесу ЕІЛ і далі, по мірі зростання часу легування, процес масопереносу поступово зменшується, потім зовсім припиняється і, більш того, може змінитись на руйнування нанесеного шару, тобто Δm_k , змінюється на $(- \Delta m_k)$;
- зі збільшенням енергії розряду, W_p процес масоперенесення збільшується, але процес руйнування нанесеного шару покриття розпочинається раніше, наприклад при $W_p = 1,3; 2,6$ і $3,4$ Дж, відповідно, після $2,0; 1,5$ і $1,0$ хв іспитів;
- зі збільшенням енергії розряду збільшується шорсткість поверхневого шару покриття і зменшується його суцільність;

- при незмінній енергії розряду за рівні проміжки часу кількість втраченої ваги (ерозії) аноду, Δm_a майже не змінюється.

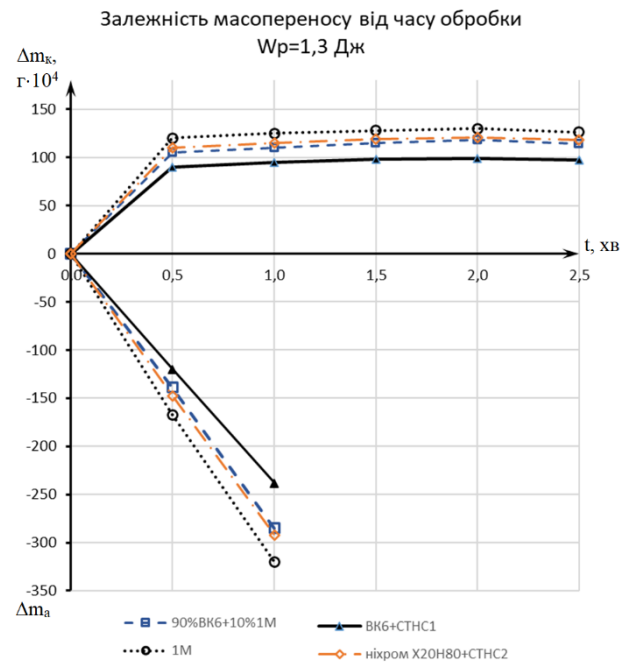
Таблиця 3.6 – Результати дослідження масопереносу матеріалу ЕІ складу: 90%ВК6 + 10% 1М) і 1М на зразки з чавуну ВЧ 50 з використанням СТНС і без них, а також шорсткість і суцільність покриттів

№ п/п Матеріал електроду- інструменту	Склад СТНС, %	Час легування, хв					Шорсткість, Ra, мкм	Суцільність, S, %
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5		
		Збільшення ваги катоду, Δm_k , $г \cdot 10^4$ / коефіцієнт масопереносу, k_m					До / після БУФО	До / після БУФО
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Енергія розряду $W_p = 0,55$ Дж								
90%ВК6+10%1 М	-	80/0,77	90	95	98	99	3,2/0,7	60/70
1М	-	90/0,76	110	115	118	119	3,3/0,8	80/90
ВК6	0,5Si+0,5B+2Cr+7Ni+90 вазелін	70/0,79	80	85	89	90	3,3/0,8	95/100
ніхром Х20Н80	5% Si+ 5% В+90% вазелін	850,78	95	100	103	103	3,5/0,7	90/95
Енергія розряду $W_p = 1,3$ Дж								
90%ВК6+10%1 М	-	105/0,7 6	110	115	118	114	3,7/0,8	55/65
1М	-	120/0,7 2	125	128	130	126	3,9/0,8	70/80
ВК6	0,5Si+0,5B+2Cr+7Ni+90 вазелін	90/0,75	95	98	99	97	4,2/0,9	85/95
ніхром Х20Н80	5% Si+ 5% В+90% вазелін	110/0,7 4	115	119	121	118	4,3/0,9	80/90
Енергія розряду $W_p = 2,6$ Дж								
90%ВК6+10%1 М	-	115/0,6 8	121	123	115	-	5,4/1,1	50/60
1М	-	140/0,6 8	150	156	142	-	5,71,1	60/70

1	2	3	4	5	6	7	8	9
ВК6	0,5Si+0,5B+2Cr+7Ni+90 вазелін	95/0,67	110	114	105	-	5,9/1,1	75/85
ніхром Х20Н80	5% Si+ 5% В+90% вазелін	120/0,6 7	130	137	123	-	6,1/1,2	70/80
Енергія розряду $W_p = 3,4$ Дж								
90%ВК6+10%1 М	-	120/0,6 5	127	118	104	-	6,0/1,2	45/55
1М	-	150/0,6 6	155	141	135	-	6,3/1,3	55/65
ВК6	0,5Si+0,5B+2Cr+7Ni+90 вазелін	105/0,6 4	109	98	91	-	6,7/1,4	70/80
ніхром Х20Н80	5% Si+ 5% В+90% вазелін	130/0,6 6	133	125	117	-	7,5/1,5	65/75



а



б

Рисунок 3.11 - Приріст ваги катоду та ерозія аноду при ЕІЛ високомісного чавуну марки ВЧ-50 компактними ЕІ, виготовленими методом порошкової металургії, складу: а - (90%ВК6+10%1М) та б - 1М.

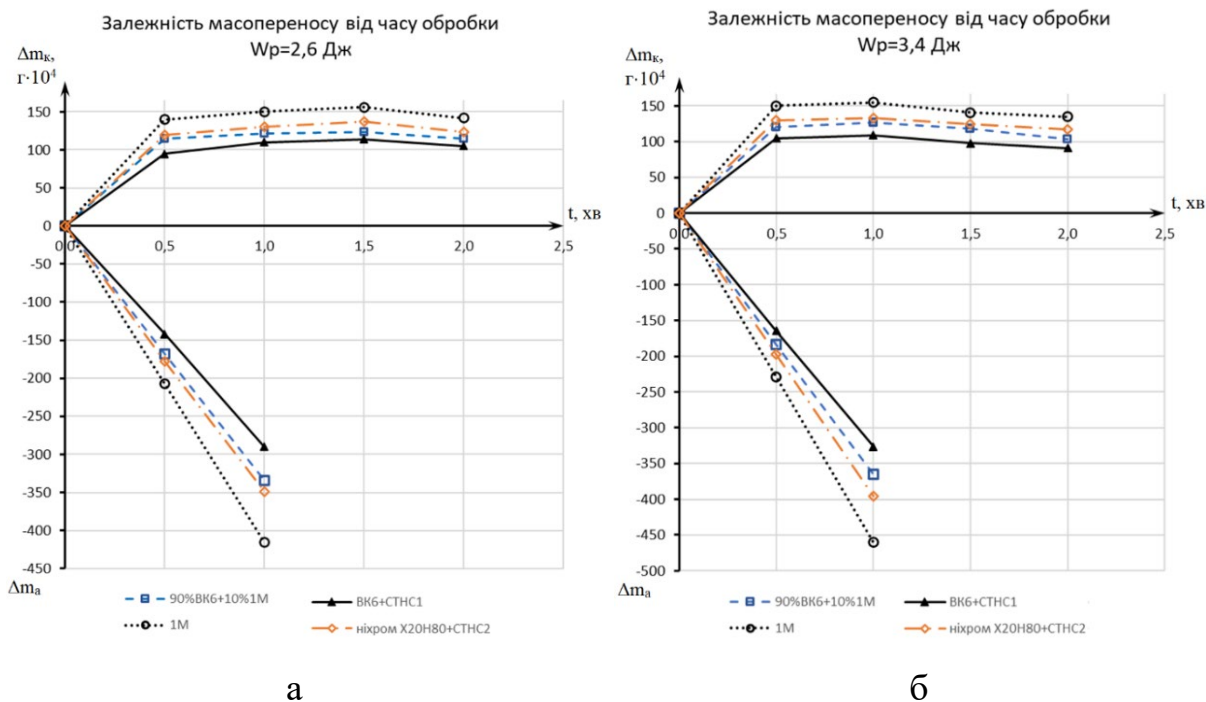


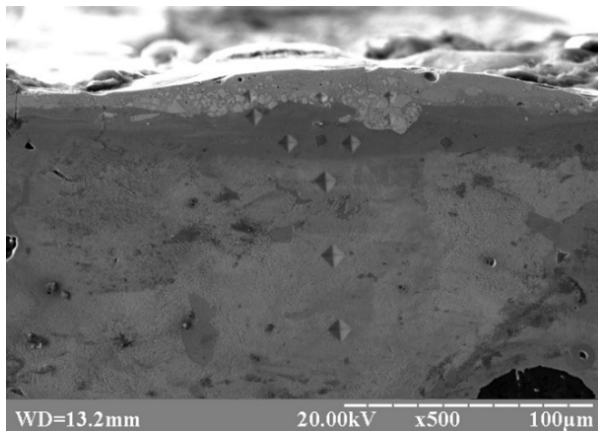
Рисунок 3.12 - Приріст ваги катоду та ерозія аноду при ЕІЛ високоміцного чавуну марки ВЧ-50 компактними ЕІ з твердого сплаву ВК6 (а) і ніхромового дроту марки Х20Н80 (б), при використанні СТНС складу, відповідно, $0,5\%Si + 0,5\%B + 2\%Cr + 7\%Ni + 90\%$ вазелін і $5\%Si + 5\%B + 90\%$ вазелін.

Металографічні дослідження

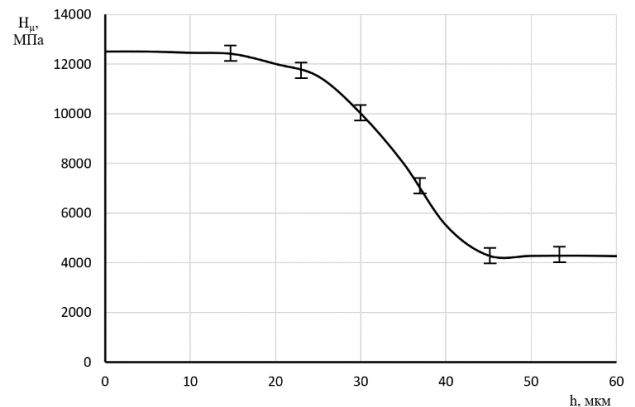
Для проведення металографічних досліджень виготовляли шліфи, які досліджували на оптичному мікроскопі "Неофот-2" та растровому електронному мікроскопі-аналізаторі "РЕМ – 106 І" ВІТ SELMI, де проводилася оцінка якості шару, його суцільності, товщини та будови зон підшару - дифузійної зони. Одночасно проводився дюрOMETричний аналіз на розподіл мікротвердості в поверхневому шарі і по глибині шліфу від поверхні. Вимірювання мікротвердості проводили на мікротвердомірі ПМТ-3 вдавленням алмазної піраміди під навантаженням $0,05$ Н, згідно з ГОСТ 9450-76. Більш детально методика досліджень представлена вище.

На рисунках 3.12-3.15 показана структура (а) і розподіл мікротвердості по глибині шару (б) при ЕІЛ чавуну марки ВЧ-50 компактними ЕІ складу: $(90\%VK6 + 10\%1M)$ та $1M$, виготовленими методом ПМ, відповідно, рисунки 3.12 і 3.13, та компактними ЕІ з твердого сплаву ВК6 (рис. 3.14) і ніхромового дроту

марки X20H80 (рис. 3.15), при використанні СТНС складу, відповідно, $0,5\%Si+0,5\%B+2\%Cr+7\%Ni+90$ вазелін і $5\%Si+5\%B+90\%$ вазелін.

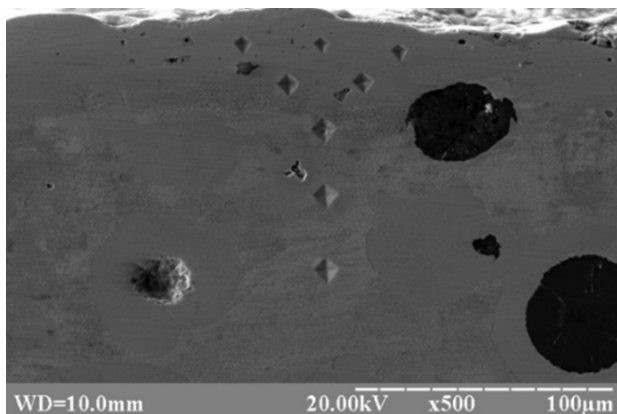


а

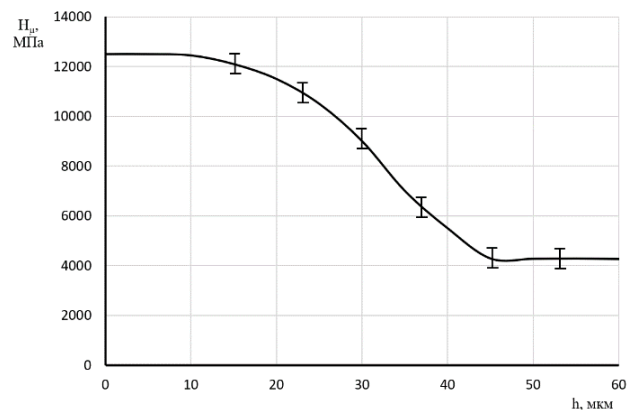


б

Рисунок 3.12 - Мікроструктура (а) та розподіл мікротвердості по глибині шару (б) при ЕІЛ високоміцного чавуну ВЧ50 компактним електродом-інструментом, складу $90\% BK6 + 10\% 1M$.



а

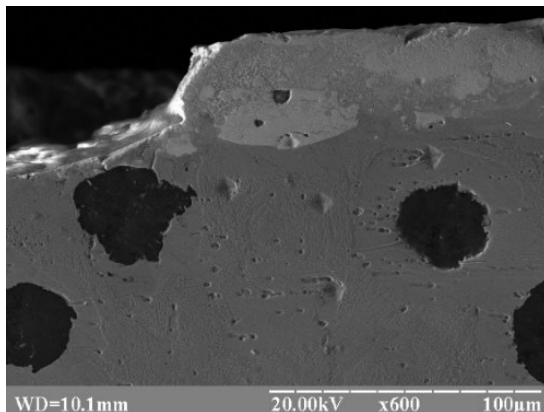


б

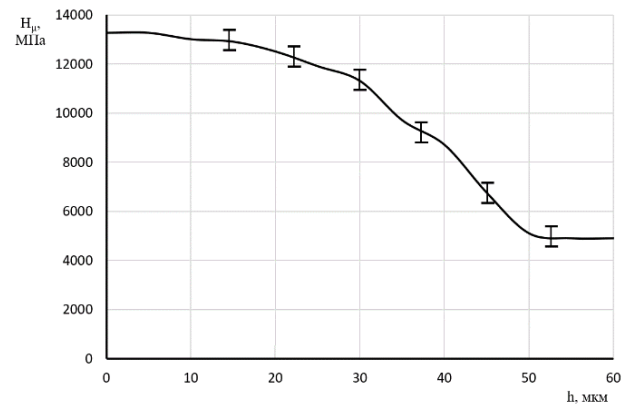
Рисунок 3.13 - Мікроструктура (а) та розподіл мікротвердості по глибині шару (б) при ЕІЛ високоміцного чавуну ВЧ50 компактним електродом-інструментом, складу $1M$.

Параметри якості поверхневих шарів покриттів, сформованих на зразках з високоміцного чавуну ВЧ50 компактними ЕІ складу: $(90\%BK6+10\%1M)$ та $1M$,

виготовленими методом ПМ, та ЕІ з твердого сплаву ВК6 і ніхромового дроту марки Х20Н80 (рисунки 4.10-4.13), при використанні СТНС, зведені в табл. 4.6.

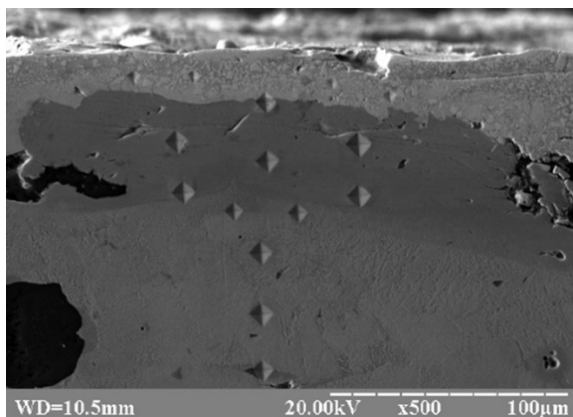


а

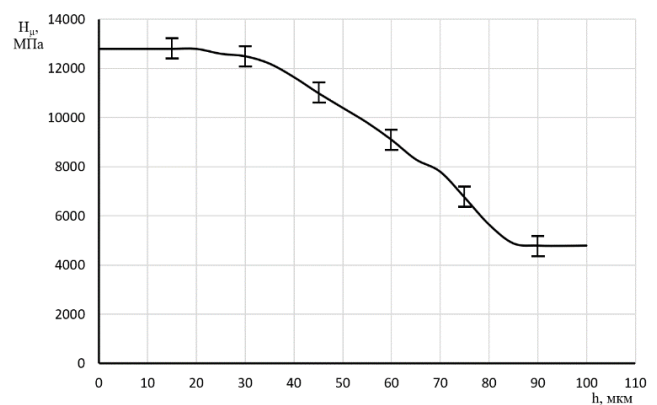


б

Рисунок 3.14 - Мікроструктура (а) та розподіл мікротвердості по глибині шару (б) при ЕІЛ ВЧ50 електродом-інструментом з твердого сплаву ВК6 з використанням СТНС складу 0,5%Si+0,5%B+2Cr+7%Ni+90 % вазелін.



а



б

Рисунок 3.15 - Мікроструктура (а) та розподіл мікротвердості по глибині шару (б) при ЕІЛ ВЧ50 ЕІ з ніхромового дроту Х20Н80 та використанням СТНС складу 5%Si+5%B+90% вазелін.

В результаті аналізу рисунків 3.12-3.15 і табл. 3.7 встановлено, що при нанесенні методом ЕІЛ покриттів на чавун марки ВЧ50, структура поверхневого шару складається з трьох ділянок «білий» і перехідний шари, товщиною, відповідно 15-75 і 10-20 мкм і основний метал. Мікротвердість «білого» шару і

перехідної зони знаходяться в межах, відповідно, 6200-13260 і 4290-4900 МПа. Вона від максимальної на поверхні поступово зменшується по мірі поглиблення.

Таблиця 3.7 – Результати металографічних досліджень зразків ВЧ50 після ЕІЛ компактними ЕІ складу: (90%ВК6+10%1М) і 1М та ЕІ з твердого сплаву ВК6 і ніхромового дроту марки Х20Н80 при використанні СТНС

Матеріал електроду	Склад СТНС, %	Товщина, мкм		Мікротвердість, МПа	
		Білог ошар у	Перехід ної зони	Білого шару	Перехідн ої зони
90%ВК6+10% 1М	-	25- 30	15	6200- 12500	4290
1М	-	25- 30	15	5970- 11300	4800
ВК6	0,5Si+0,5B+2Cr+7Ni +90 вазелін	15- 40	10	9540- 13260	4900
Ніхром Х20Н80	5% Si+ 5% В+90% вазелін	45- 75	20	8200- 12800	4780

Найбільша мікротвердість, відповідно 13260 і 12800 МПа, отримана при використанні компактних ЕІ з твердого сплаву ВК6 і ніхромового дроту Х20Н80 та використанням СТНС, відповідно, 0,5%Si+0,5%B+2Cr+7%Ni+90 % вазелін та 5%Si+5%B+90% вазелін. При цьому товщина їх шару підвищеної твердості досягає, відповідно 50 і 90 мкм (рисунки 3.14 та 3.15).

Дослідження на растровому електронному мікроскопі «РЕМ-106 І» Сумського ВАТ SELMI

З метою визначення елементного складу покриття в характерних точках проводився якісний і кількісний локальний аналіз.

Якісний аналіз і кількісний склад покриттів на зразках з високоміцного чавуну ВЧ 50 складу (90%ВК6+10%1М) та 1М, сформованих на їх поверхні методом ЕІЛ, як компактними ЕІ, виготовленими спіканням методом порошкової металургії, так і з використанням СТНС, проводився на електронному мікроскопі РЕММА – 102 виробництва ВАТ SELMI, оснащеного рентгенівським спектрометром на базі кремній літієвого напівпровідникового детектора. При цьому на поверхні покриття вибирали 3 точки (гладка поверхня, шорстка поверхня і пора) і в кожній точці визначався елементний склад нанесеного покриття. Крім цього розподіл елементів по глибині в поверхневому шарі визначали на електронному мікроскопі з камерою низького вакууму і системою енергодисперсійного мікроаналізу РЕМ-106. Мікроскоп призначений для дослідження рельєфу поверхні різних об'єктів у твердій фазі і визначення елементного складу об'єктів методом рентгенівського мікроаналізу по енергіях квантів характеристичного випромінювання в двох режимах: високого вакууму і низького вакууму. Дослідження об'єктів у вторинних електронах забезпечує топографічний контраст. У відображених електронах – елементний контраст. Встановлений на приладі детектор XR-100FASTSDD фірми Amptek (США) дозволяє проводити якісний і кількісний елементний аналізи досліджуваної області об'єкта.

На рис. 3.16 представлена топографія поверхні зразків при ЕІЛ чавуну марки ВЧ50 компактним ЕІ 90%ВК6 + 10%1М і 1М. Для отримання результатів наявності і кількості хімічних елементів на поверхні покриття обирали три характерні крапки: 1 – шорстка поверхня, 2 – пора і 3 – гладка поверхня. З кожної крапки знімали спектр належності досліджуваних елементів і крім цього знімався загальний спектр з усієї ділянки поверхні (Σ).

Кількісний склад хімічних елементів, як в характерних точках покриттів, нанесених методом ЕІЛ компактними ЕІ складу 90%ВК6 + 10%1М і 1М на чавуні марки ВЧ50, так і з усієї досліджуваної поверхні представлений в табл. 3.8.

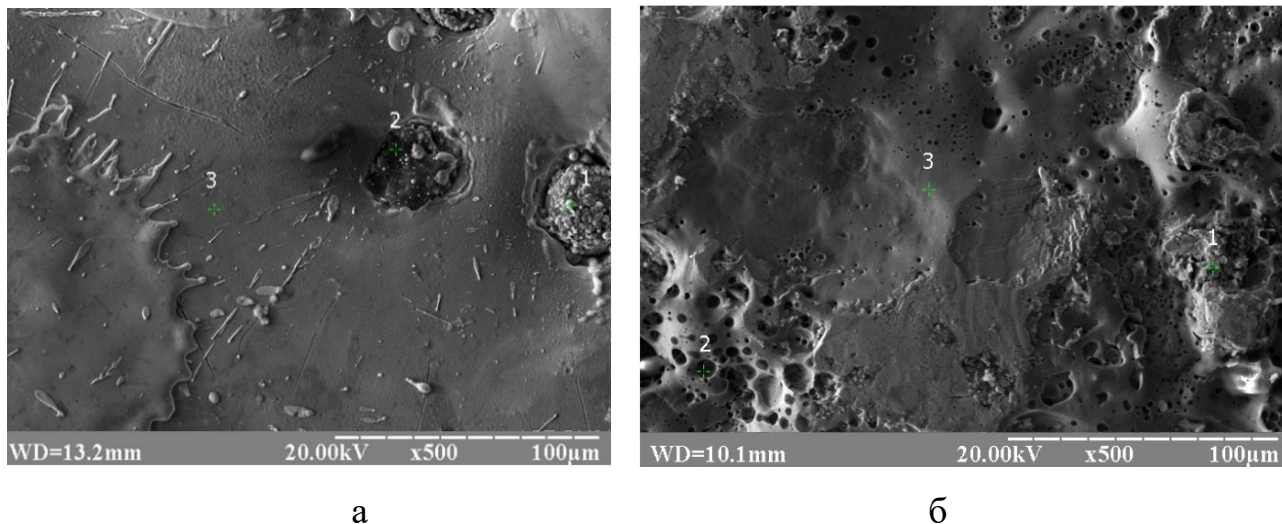


Рисунок 3.16 - Топографія ділянки поверхні зразків при ЕІЛ чавуну марки ВЧ50 компактним ЕІ 90%ВК6 + 10%1М (а) і 1М (б). 1 – шорстка поверхня, 2 – пора, 3 – гладка поверхня.

Аналіз рис. 3.16 і табл. 3.8 показав, що на поверхні сформованих покриттів, коли в якості ЕІ використовували компактні електроди 90%ВК6 + 10%1М і 1М присутні хімічні елементи, що входять в склад їх склад і незначна кількість заліза, що входить в склад зразків. При цьому найбільша кількість заліза знаходиться в порах – 8,09 і 3,98%, і покриттях, відповідно складу 90%ВК6 + 10%1М і 1М.

На рис. 3.17 представлена топографія поверхні зразків при ЕІЛ чавуну марки ВЧ50 компактними ЕІ з твердого сплаву ВК6 (рис. 3.17, а) і ніхромового дроту марки Х20Н80 (рис. 3.17, б), при використанні СТНС складу, відповідно, 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90 вазелін і 5%Si+5%B+90% вазелін.

Для отримання результатів наявності і кількості хімічних елементів на поверхні покриття обирали три характерні крапки: 1 – шорстка поверхня, 2 – пора і 3 – гладка поверхня. З кожної крапки знімали спектр належності досліджуваних елементів і крім цього знімався загальний спектр з усієї ділянки поверхні (Σ).

Таблиця 3.8 - Елементний склад покриттів в характерних точках і зі всієї досліджуваної поверхні*

Досліджувана точка та ділянка (Σ) поверхні	Елементи, %							
	C	W	Co	B	Si	Cr	Ni	Fe
90%BK6 + 10%1M								
1	2,48	87, 15	3,81	-	1,50	0,20	0,70	4,16
2	2,97	83, 12	3, 14	-	1,70	0,17	0,81	8,09
3	2,54	86,42	3,57	-	1,10	0,19	0,69	5,49
Σ	2,61	85, 91	3, 12	-	0,89	0,19	0,68	6,60
1M: 70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% B								
1	3,16	-	-	4,17	4,71	17,41	69,23	1,32
2	3,27	-	-	4,01	4,53	16, 29	67,92	3,98
3	3,41	-	-	4,20	4,71	16,97	68,20	2,51
Σ	3,31	-	-	4,28	4,32	17,07	69,05	1,97

* 1 – шорстка поверхня, 2 – пора, 3 – гладка поверхня

Кількісний склад хімічних елементів, як в характерних точках покриттів, нанесених методом ЕІЛ компактними ЕІ з твердого сплаву ВК6 (а) і ніхромового дроту марки Х20Н80 (б) з використанням СТНС, відповідно, 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90вазелін і 5%Si+5%B+90%вазелін на чавуні марки ВЧ50, так і з усієї досліджуваної поверхні представлений в табл. 3.9.

Аналіз рис. 3.17 і табл. 3.9 показав, що на поверхні сформованих покриттів, коли в якості ЕІ використовували компактні ЕІ з твердого сплаву ВК6 і ніхромового дроту марки Х20Н80 з використанням СТНС, відповідно, 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90вазелін і 5%Si+5%B+90%вазелін присутні хімічні елементи, що входять в їх склад і незначна кількість заліза, що входить в склад зразків.

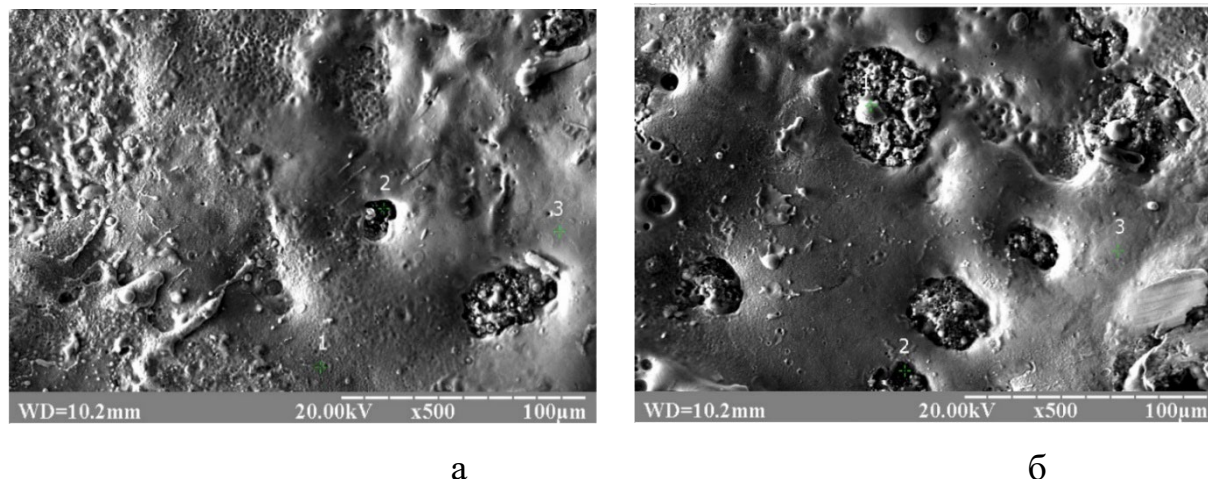


Рисунок 3.17 - Топографія ділянки поверхні зразків при ЕІЛ чавуну марки ВЧ50
ЕІ з твердого сплаву ВК6 (а) і ніхромового дроту марки Х20Н80 (б) з
використанням СТНС, відповідно, 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90 вазелін і
5%Si+5%B+90% вазелін (1 – шорстка поверхня, 2 – пора, 3 – гладка поверхня).

Таблиця 3.9 - Елементний склад покриттів в характерних точках і зі всієї
досліджуваної поверхні*

Досліджувана точка та ділянка (Σ) поверхні	Елементи, %							
	C	W	Co	B	Si	Cr	Ni	Fe
Компактний ЕІ ВК6 і СТНС, складу 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90вазелін								
1	2,51	84, 16	3,91	0,39	0,41	1,59	6,27	0,76
2	2,85	82, 23	3, 74	0,27	1,20	1,61	5,93	2,17
3	2,59	83, 91	3,63	0,28	0,41	1,84	6,42	0,92
Σ	2,71	83, 71	3, 71	0,49	0,49	1,86	6,79	0,73
Компактний ЕІ марки Х20Н80 і СТНС, складу 5%Si+5%B+90% вазелін								
1	3,24	-	-	4,17	4,71	17,13	68,31	2,44
2	3,85	-	-	4,01	4,53	16,21	63,79	7,61
3	3,43	-	-	4,20	4,71	17,82	66, 41	3,43
Σ	3,37	-	-	4,28	4,32	17,98	66,89	3,16

* 1 – шорстка поверхня, 2 – пора, 3 – гладка поверхня

При цьому найбільша кількість заліза знаходиться в порах - 7,61 і 2,17% і покриттях, відповідно, сформованих компактними ЕІ з ніхромового дроту марки Х20Н80 і твердого сплаву ВК6. Найбільша кількість хімічних елементів в покриттях відповідає хімічним елементам, що входять в склад компактних електродів. Це вольфрам і кобальт, що входять в склад твердого сплаву ВК6 і нікель і хром з яких складаються ЕІ з ніхромового дроту марки Х20Н80.

На рис. 3.18 показана лінія сканування хімічних елементів по глибині поверхневого шару зразка з чавуну марки ВЧ50 після легування компактним ЕІ 90%ВК6 + 10%1М, а в табл. 3.10 результати локального енергодисперсійного аналізу сформованого покриття.

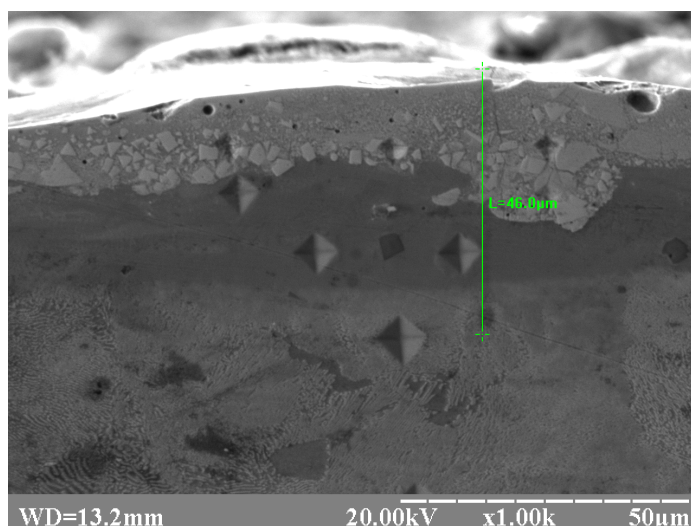


Рисунок 3.18 – Лінія сканування та розподіл мікротвердості по глибині шару при ЕІЛ ВЧ50 компактним ЕІ складу 90% ВК6 + 10% 1М.

Аналіз табл. 3.10 показує, що вольфрам і кобальт максимальна кількість яких на поверхні складає, відповідно 85,23 і 3,76%, а також нікель (0,67%) по мірі заглиблення поступово знижується, і на глибині ~ 50 мкм зовсім зникають. Залізо, що є основним елементом чавуну, від мінімальної кількості на поверхні 6,28%, навпаки, поступово збільшується і на глибині ~ 50 мкм відповідає кількості, що знаходиться в чавуні марки ВЧ50. На глибині ~ 20 мкм з'являється марганець (0,11%), який по мірі заглиблення поступово збільшується до кількості, що є в чавуні марки ВЧ50 $\sim 0,3-0,7\%$. Кремній і хром входять в склад

чавуну марки ВЧ50 і по усій глибині сканування їх кількість відповідає кількості, що входить в основу.

Таблиця 3.10 – Результати локального енергодисперсійного аналізу покриття, сформованого на зразку з чавуну марки ВЧ50 після ЕІЛ компактним ЕІ складу 90% ВК6 + 10% 1М

Покриття 90% ВК6 + 10% 1М, крок сканування 10 мкм									
С	W	Co	B	Si	Cr	Ni	Mn	Fe	Σ, %
2,37	85,23	3,76	-	1,48	0,21	0,67	-	6,28	100
2,57	84,16	3,72	-	1,32	0,18	0,61	-	7,44	100
2,62	76,17	3,12	-	1,38	0,14	0,43	0,11	16,03	100
2,91	41,14	1,91	-	1,46	0,16	0,21	0,24	51,97	100
3,51	17,21	0,73	-	1,39	0,13	0,08	0,41	76,54	100
3,63	0,78	0,13	-	1,58	0,12	0,02	0,49	93,25	100
3,58	-	-	-	1,92	0,15	-	0,53	93,82	100
3,43	-	-	-	1,32	0,14		0,46	94,65	100

На рис. 3.19 показана лінія сканування хімічних елементів по глибині поверхневого шару зразка з чавуну марки ВЧ50 після легування компактним ЕІ 1М, а в табл. 3.11 результати локального енергодисперсійного аналізу сформованого покриття.

Аналіз табл. 3.11 показує, що нікель і хром максимальна кількість яких на поверхні складає, відповідно 68,03 і 17,67%, а також кремній (4,55%) і бор (4,11%) по мірі заглиблення поступово знижується, і на глибині ~ 60 мкм зовсім зникають, крім кремнію, який входить в склад хімічних елементів чавуну марки ВЧ50. Залізо, що є основним елементом чавуну, від мінімальної кількості на поверхні 2,28%, навпаки, поступово збільшується і на глибині ~ 60 мкм відповідає кількості, що знаходиться в чавуні марки ВЧ50.

На глибині ~ 20 мкм з'являється марганець (0,17%), який по мірі заглиблення поступово збільшується до кількості, що є в чавуні марки ВЧ50 ~ 0,3-0,7%.

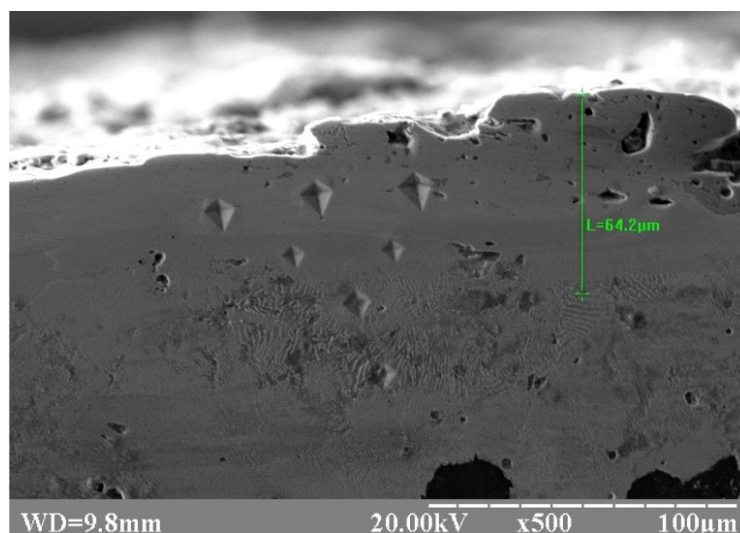


Рисунок 3.19 – Лінія сканування та розподіл мікротвердості по глибині шару при ЕІЛ ВЧ50 компактним ЕІ складу 1М.

Таблиця 3.11 - Результати локального енергодисперсійного аналізу покриття, сформованого на зразку з чавуну марки ВЧ50 після ЕІЛ компактним ЕІ складу 1М: 70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% B

Покриття 1М: 70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% B, крок сканування 10 мкм									
C	W	Co	B	Si	Cr	Ni	Mn	Fe	Σ, %
3,36	-	-	4,11	4,55	17,67	68,03	-	2,28	100
3,21	-	-	4, 01	4,07	14,31	61,15	-	13,25	100
3,51	-	-	3,34	3,58	10,28	43,14	0,17	35,98	100
3,64	-	-	2, 23	2,14	4,72	23,54	0,23	63,50	100
3,52	-	-	0,72	1,89	1,12	8,95	0,31	83,49	100
3,67	-	-	0,01	1,61	0,43	0,73	0,38	93,17	100
3,70	-	-	-	1,91	0,13	-	0,52	93,73	100
2,93	-	-	-	1,33	0,12	-	0,47	95,14	100

На рис. 3.20 показана лінія сканування хімічних елементів по глибині поверхневого шару зразка з чавуну марки ВЧ50 після легування компактним ЕІ ВК6 і СТНС, складу 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін, а в табл. 3.12 результати локального енергодисперсійного аналізу сформованого покриття.

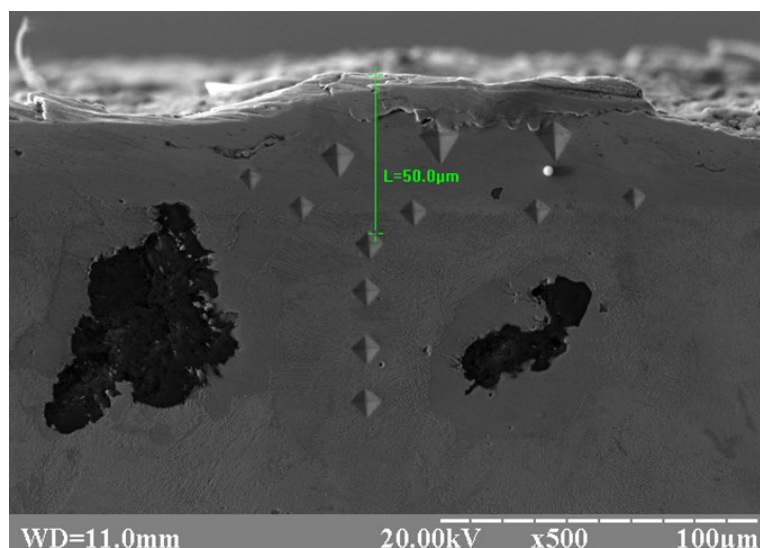


Рисунок 3.20 – Лінія сканування та розподіл мікротвердості по глибині шару при ЕІЛ зразків з чавуну марки ВЧ50 ЕІ з твердого сплаву ВК6 і СТНС.

Таблиця 3.12 - Результати локального енергодисперсійного аналізу покриття, сформованого на зразку з чавуну марки ВЧ50 після ЕІЛ компактним ЕІ з твердого сплаву ВК6 з використанням СТНС складу 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін

Покриття з твердого сплаву ВК6 з СТНС: 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін, крок сканування 10 мкм									
C	W	Co	B	Si	Cr	Ni	Mn	Fe	Σ,%
2,61	84,17	3,91	0,39	1,22	1,51	2,53	-	3,66	100
2,79	79,14	2,76	0,37	1,25	1,32	2,14	-	10,23	100
2,91	51,67	1,15	0,32	1,38	1,14	1,37	-	40,06	100
2,73	11,17	0,73	0,27	1,42	0,23	0,75	0,12	82,58	100
3,10	0,95	0,07	0,08	1,72	0,15	0,33	0,32	93,28	100
3,43	0,06	0,01	-	1,63	0,14	0,02	0,44	94,27	100
3,58	-	-	-	1,81	0,15	-	0,53	93,93	100
3,39	-	-	-	1,34	0,13	-	0,45	94,69	100

Аналіз табл. 3.12 показує, що вольфрам і кобальт максимальна кількість яких на поверхні складає, відповідно 84,17 і 3,91%, а також нікель (2,53%), хром (1,51%) і бор (0,39%) по мірі заглиблення поступово знижується, і на глибині ~ 50 мкм, крім хрому, який входить в склад чавуну марки ВЧ50 зовсім зникають. Залізо, що є основним елементом чавуну, від мінімальної кількості на поверхні 3,66%, навпаки, поступово збільшується і на глибині ~ 50 мкм відповідає кількості, що знаходиться в чавуні марки ВЧ50. На глибині ~ 30 мкм з'являється марганець (0,12%), який по мірі заглиблення поступово збільшується до кількості, що є в чавуні марки ВЧ50 ~ 0,3-0,7%. Кремній і хром входять в склад чавуну марки ВЧ50 і по усій глибині сканування їх кількість відповідає кількості, що входить в основу.

На рис. 3.21 показана лінія сканування хімічних елементів по глибині поверхневого шару зразка з чавуну марки ВЧ50 після легування компакним ЕІ марки Х20Н80 і СТНС, складу 5%Si+5%B+90% вазелін, а в табл. 3.13 результати локального енергодисперсійного аналізу сформованого покриття.

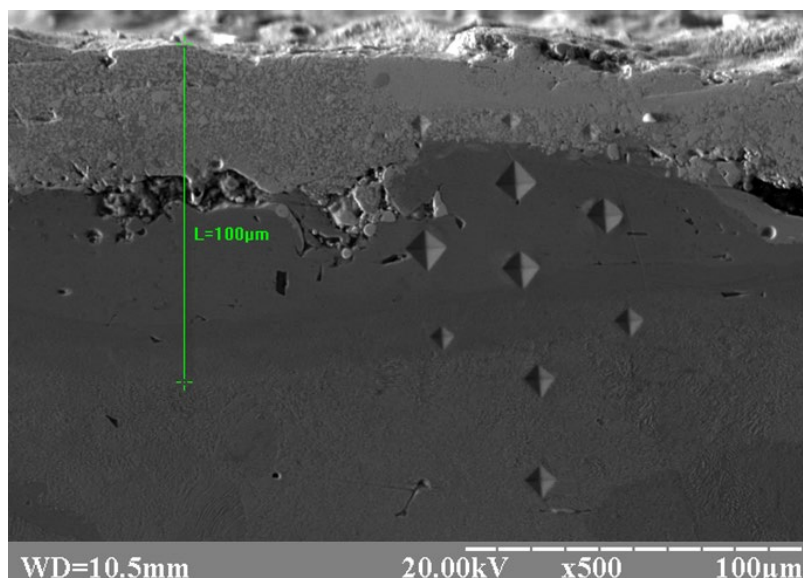


Рисунок 3.21 – Лінія сканування та розподіл мікротвердості по глибині шару при ЕІЛ зразків з високоміцного чавуну марки ВЧ50 ЕІ марки Х20Н80 і СТНС, складу 5%Si+5%B+90% вазелін.

Таблиця 3.13 - Результати локального енергодисперсійного аналізу покриття, сформованого на зразку з чавуну марки ВЧ50 після ЕІЛ компактним ЕІ марки Х20Н80 і СТНС, складу 5%Si+5%B+90% вазелін

Покриття з твердого сплаву ВК6 з СТНС: 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін, крок сканування 10 мкм									
С	W	Co	B	Si	Cr	Ni	Mn	Fe	Σ,%
3,15	-	-	4,27	4,56	17,11	68,81	-	2,10	100
2,91	-	-	4,15	4,34	17,43	67,14	-	4,03	100
2,95	-	-	4,04	4,13	16,38	65,63	-	6,87	100
2,79	-	-	3,41	3,45	16,89	59,12	0,21	14,13	100
2,76	-	-	2,77	2,43	14,21	55,18	0,17	22,48	100
3,41	-	-	0,17	1,98	6,32	21, 23	0,14	66,75	100
3,52	-	-	0,11	1,64	0,72	0,93	0,31	92,77	100
3,43	-	-	-	1,90	0,27	0,04	0,27	94,09	100
3,29	-	-	-	1,45	0,19	-	0,43	94,64	100
3,62	-	-	-	1,63	0,14	-	0,47	94,14	100
3,58	-	-	-	1,41	0,15	-	0,51	94,35	100
2,95	-	-	-	1,38	0,13	-	0,32	95,22	100

Аналіз табл. 3.13 показує, що нікель і хром максимальна кількість яких на поверхні складає, відповідно 68,81 і 17,11%, а також кремній (4,56%) і бор (4,27%) по мірі заглиблення поступово знижується, і на глибині ~ 70 мкм зовсім зникають, крім кремнію і хрому, які входять в склад хімічних елементів чавуну марки ВЧ50. Залізо, що є основним елементом чавуну, від мінімальної кількості на поверхні 2,10%, навпаки, поступово збільшується і на глибині ~ 70 мкм відповідає кількості, що знаходиться в чавуні марки ВЧ50. На глибині ~ 30 мкм з'являється марганець (0,21%), який по мірі заглиблення поступово збільшується до кількості, що є в чавуні марки ВЧ50 ~ 0,3-0,7%.

3.3. Висновки:

1. Розроблений новий спосіб формування захисних покриттів сталених деталей, що працюють в умовах абразивного зношування, як в загальному машинобудуванні, складу 90% ВК6+10%1М, так і на виробництвах де може бути радіаційне опромінювання - 1М (70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% B), шляхом їх нанесення методом ЕІЛ компактними ЕІ з ніхромового дроту Х20Н80 і твердого сплаву ВК6 та використання СТНС, в склад яких входять необхідні легуючі елементи.

2. Поверхневі шари сталі 45 і Р6М5 після нанесення зносостійких покриттів мають структуру, яка складається з трьох ділянок: зверху «білий шар», нижче перехідна зона і основний метал. При збільшенні енергії розряду зростають товщина «білого шару» і перехідної зони, а також мікротвердість і шорсткість поверхні, але суцільність зменшується. Найвища мікротвердість 9750-12800 і 14250-14600 МПа належить покриттям сформованим, відповідно, на сталі 45 і Р6М5 при ЕІЛ компактними ЕІ з твердого сплаву ВК6 і СТНС складу 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7% Ni+90% вазелін.

3. При нанесенні методом ЕІЛ на чавун марки ВЧ50, покриттів, як компактними ЕІ, складу 90% ВК6 + 10% 1М і 1М так і ЕІ з твердого сплаву ВК6 і ніхромового дроту Х20Н80 з використанням СТНС, складу, відповідно, 0,5%Si+0,5%B+2Cr+7%Ni+90 % вазелін та 5%Si+5%B+90% вазелін, структура поверхневого шару складається з трьох ділянок «білий» і перехідний шари, товщиною, відповідно 15-75 і 10-20 мкм і основний метал. Найвища мікротвердість, відповідно 13260 і 12800 МПа, отримана при використанні компактних ЕІ з твердого сплаву ВК6 і ніхромового дроту Х20Н80 та використанням СТНС, а товщина їх шару підвищеної твердості досягає, відповідно 50 і 90 мкм.

4. В результаті дослідження масопереносу при ЕІЛ зразків з чавуну марки ВЧ50, як компактними ЕІ складу 90% ВК6 + 10% 1М і 1М, так і ЕІ з твердого сплаву ВК6 і ніхромового дроту Х20Н80 з використанням СТНС:

- зі збільшенням часу легування збільшується кількість перенесеного матеріалу, з аноду, (Δm_a) на катод, (Δm_k), а шорсткість і суцільність покриття практично не змінюється;
- найбільша кількість матеріалу переноситься з початку процесу ЕІЛ, потім процес масопереносу поступово зменшується, зовсім припиняється і може змінитись руйнуванням нанесеного шару, тобто Δm_k стає від'ємним ($-\Delta m_k$);
- зі збільшенням енергії розряду, W_p процес масопереносу збільшується, але процес руйнування нанесеного шару покриття розпочинається раніше, при цьому збільшується шорсткість покриття і зменшується його суцільність;
- при незмінній енергії розряду за рівні проміжки часу кількість втраченої ваги (ерозії) аноду, Δm_a майже не змінюється.

5. Поверхня покриттів нанесених, тільки компактними ЕІ, так і з використанням СТНС, складається з їх хімічних елементів і незначної кількості заліза, що входить в склад зразків. При цьому найбільша кількість заліза знаходиться в порах.

6. Кількість легуючих елементів, які знаходяться в покритті, по мірі заглиблення поступово зменшується і на глибині ~ 50 мкм для покриттів складу 90% ВК6 + 10% 1М і твердого сплаву ВК6 та елементів СТНС і, відповідно 60 і 70 мкм, для покриттів складу 1М і ніхромового дроту Х20Н80 та елементів СТНС, повністю зникає, а кількість заліза збільшується.

7. За матеріалами розділу опубліковані наступні роботи [138. 139, 149-151].

РОЗДІЛ 4

ВЛАСТИВОСТІ ЗМІЦНЕНИХ ДЕТАЛЕЙ ЗІ СТАЛІ ТА ЧАВУНУ. ПРОМИСЛОВЕ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1. Оцінка впливу покриттів складу 90% ВК6+10%1М і 1М, сформованих на сталених поверхнях, на топографічні та механічні властивості деталей

4.1.1. Вступ

В розділі 3 описаний новий спосіб формування захисних покриттів сталених деталей, що працюють в умовах абразивного зношування, як в загальному машинобудуванні, складу 90% ВК6+10%1М, так і на виробництвах де може бути радіаційне опромінювання – 1М (70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% B), шляхом їх нанесення методом електроіскрового легування компактними електродами-інструментами з ніхромового дроту Х20Н80 і твердого сплаву ВК6 та використання спеціальних технологічних середовищ (СТНС), в склад яких входять відсутні легуючі елементи.

В результаті проведених досліджень встановлено, що поверхневі шари сталі 45 і Р6М5 після нанесення зносостійких покриттів мають структуру, яка складається з трьох ділянок: зверху «білий шар», нижче перехідна зона і основний метал. При збільшенні енергії розряду, (W_p) з 0,52 до 2,6 Дж зростають товщина «білого шару» і перехідної зони, їх мікротвердість і шорсткість поверхні, але суцільність, нанесеного покриття, зменшується. Найвища мікротвердість 9750-12800 і 14250-14600 МПа належить покриттям сформованим, відповідно, на сталі 45 і Р6М5 при ЕІЛ компактними електродами-інструментами з твердого сплаву ВК6 і спеціального технологічного середовища (СТНС) складу 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7% Ni+90% вазелін.

Актуальними задачами, які також потрібно вирішити, залишаються визначення впливу захисних покриттів, складу 1М (70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% B) і 90% ВК6+10%1М, нанесених методом ЕІЛ на поверхні сталених деталей компактними електродами-інструментами з ніхромового дроту Х20Н80 і з

твердого сплаву ВК6, з використанням СТС, на їх стійкість при гідроабразивному зношуванні, а також їх вплив на механічні властивості деталей.

4.1.2. Оцінка зносостійкості покриттів складу 90% ВК6+10%1М і 1М, сформованих на сталевих поверхнях

Методика досліджень

З метою оцінки зносостійкості проти дії на поверхню, що зношується, абразиву виготовляли зразки зі сталі 45 і Р6М5 розміром 15×15×10 мм без покриттів і з покриттями, нанесеними згідно табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Серії зразків для випробувань на стійкість проти гідроабразивного зношування

Матеріал зразка	Електрод - інструмент	Матеріал електроду-інструменту	Склад спеціального технологічного середовища
Сталь 45	-	-	-
Сталь Р6М5	-	-	-
Сталь 45	Виготовлений методом порошкової металургії (ПМ)	90% ВК6 + 10% 1М	-
		1М	-
Сталь Р6М5		90% ВК6 + 10% 1М	-
		1М	-
Сталь 45	Ніхромовий дріт Ø3мм	X20H80	5%Si+5%B+90% вазелін 0,5%Si+0,5%B+59%ВК6+ + 40% вазелін
	Стандартні пластини, розміром 2×3×30 мм	твердий сплав ВК6	0,5%Si+0,5%B+2%Cr+ +7%Ni+90% вазелін
Сталь Р6М5	Ніхромовий дріт Ø3мм	X20H80	5%Si+5%B+90% вазелін 0,5%Si+0,5%B+59%ВК6+ +40% вазелін
	Стандартні пластини, розміром 2×3×30 мм	твердий сплав ВК6	0,5%Si+0,5%B+2%Cr+ +7%Ni+90% вазелін

Для проведення випробувань зразків на гідроабразивну зносостійкість використовували дослідну установку (рис. 4.1, а), яка детально описана в [151]. Як абразивний матеріал використовували водну суміш піску з розміром частинок 0,1- 0,5 мм (рис. 3.1, б) і концентрацією 100 г/л.

Зразки для визначення інтегрального зносу всієї поверхні перед випробуванням зважували на аналітичних вагах ВЛА-200 з точністю до 0,0001 г. Інтегральний (ваговий) знос визначали як різницю ваги зразка до і після проведення випробувань. Показники контролювали через кожні 6 годин. Дослідження проводили протягом 24 годин.

Зразки фіксували на диску за допомогою тримачів (рис. 4.1, в, г). Кріплення тримача до диска дозволяло змінювати кут контакту зразка з абразивом. В процесі випробувань зразки, закріплені під кутом 45° , оберталися зі швидкістю 120 об / хв.

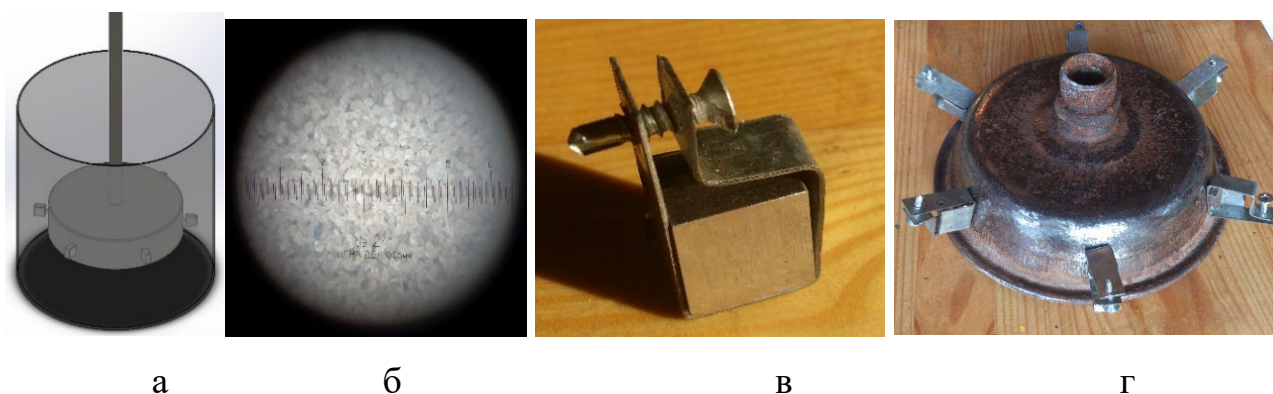


Рисунок 4.1 – Дослідна установка для визначення гідроабразивної зносостійкості: а - схема; б - розмір часток піску; в - фіксація зразків на диску; г - розміщення тримачів на диску.

Зразки без покриттів із покриттями, згідно табл. 4.1, випробували двома партіями, окремо зі сталі 45 і сталі Р6М5, по 6 зразків у кожній партії:

1-й зразок – без покриття;

2-й зразок – покриття 90% ВК6 + 10% 1М (електрод виготовлений методом ПМ);

3-й зразок – покриття 1М (електрод виготовлений методом ПМ);

4-й зразок – покриття електродом – інструментом з ніхромового дроту складу X20H80 з використанням СТС складу 5%Si+5%B+90% вазелін;

5-й зразок – покриття електродом – інструментом з ніхромового дроту складу X20H80 з використанням СТС складу 0,5%Si+0,5%B+59%BK6+40%+ вазелін;

6-й зразок – покриття електродом – інструментом з твердого сплаву BK6 з використанням СТС складу 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін.

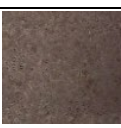
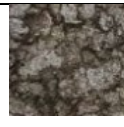
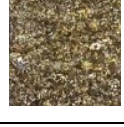
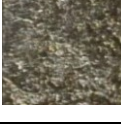
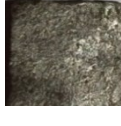
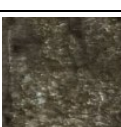
Результати досліджень

З метою оцінки гідроабразивної зносостійкості покриттів, сформованих за різною технологією, проводилися випробування на знос.

В табл. 4.2 представлені результати дослідження зразків сталі 45 без покриття і з покриттями, нанесеними методом ЕІЛ: електродами виготовленими методом ПМ, відповідно 1М і 90% BK6 + 10% і за новою технологією, відповідно, компактним електродом-інструментом з ніхромового дроту складу X20H80 з використанням СТС складу 5%Si+5%B+90% вазелін і складу 0,5%Si+0,5%B+59%BK6+40% вазелін, а також компактним електродом-інструментом з твердого сплаву BK6 і з використанням СТС складу 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін.

На рис. 4.2 представлені графіки зміни втрати маси при гідроабразивному зношуванні зразків сталі 45 без покриття (1) і з покриттями, нанесеними методом ЕІЛ електродами виготовленими методом ПМ, відповідно 1М (2) і 90% BK6 + 10% 1М (4) і за новою технологією, відповідно, компактним електродом-інструментом з ніхромового дроту складу X20H80 з використанням СТС складу 5%Si+5%B+90% вазелін (3) і складу 0,5%Si+0,5%B+59%BK6+40% вазелін (5), а також компактним електродом – інструментом з твердого сплаву BK6 і з використанням СТС складу 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін (6).

Таблиця 4.2 – Результати інтенсивності зношення зразків сталі 45

№	Покриття	Час зношування, год				Зразок до зносу	Зразок після зносу
		6	12	18	24		
		Втрата ваги,Δm, мг					
1.	. Без покриття.	103	215	344	491		
2.	Електродом 100% 1М, виготовленим методом ПМ.	71	146	230	325		
3.	Електродом90% ВК6 + 10% 1М, виготовленим методом ПМ..	61	124	193	270		
4.	Електродом з ніхромового дроту складу Х20Н80 з використанням СТНС складу 5%Si+5%B+90% вазелін.	65	133	207	289		
5.	Електродом з ніхромового дроту складу Х20Н80 з використанням СТНС складу 0,5%Si+0,5%B+59%BK6+40%+ вазелін.	58	118	183	254		
6.	Електродом з твердого сплаву ВК6 з використанням СТНС складу 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін.	51	104	160	221		

В результаті аналізу табл. 4.2 і рис. 4.2 встановлено, що кращою стійкістю проти гідроабразивного зносу володіють зразки сталі 45 з покриттям нанесеним методом ЕІЛ електродом з твердого сплаву ВК6 з використанням СТНС складу 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін. Після 24 годин випробувань знос цих зразків складає 221 мг. Знос зразків з покриттям, нанесеним методом ЕІЛ електродом з ніхромового дроту складу Х20Н80 з використанням СТНС складу 0,5%Si+0,5%B+59%BK6+40% вазеліні СТНС складу 5%Si+5%B+90% вазелін, складає, відповідно, на ~ 15 і 31 % більше, тобто 254 і 289 мг, а з покриттями, нанесеними ЕІ виготовленим методом ПМ, складу 90% ВК6 + 10% 1М і 1М більше, відповідно, на ~ 22 і 47 %, тобто 270 і 325 мг. Найбільший знос у зразків без покриття, який складає 491 мг, що на 122 % більше ніж у зразка з покриттям, нанесеним методом ЕІЛ за новою технологією, ЕІ з твердого сплаву ВК6 з використанням СТНС складу 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін.

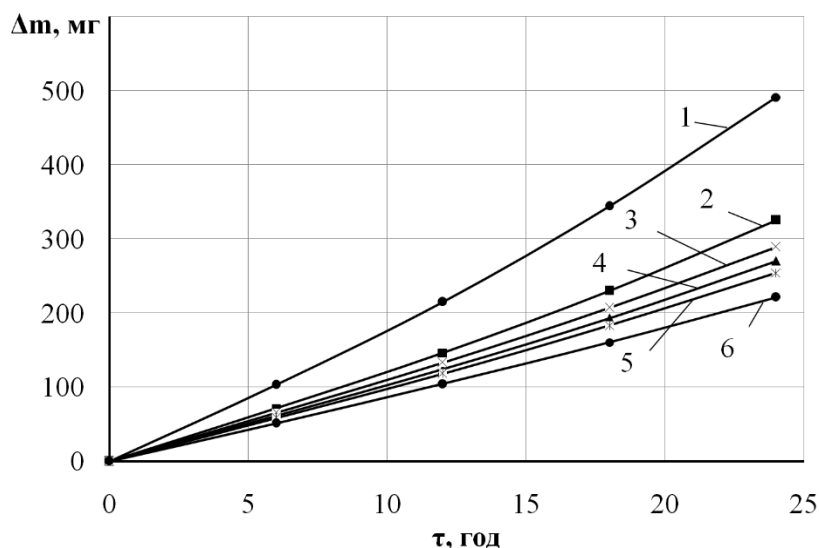


Рисунок 4.2 - Залежність гідроабразивного зносу (по втраті маси) від часу випробування зразків сталі 45: 1 – без покриття, 2 – ЕІЛ ЕІ марки 1М, виготовленим методом ПМ, 3– ЕІЛ ЕІ з ніхромового дроту марки Х20Н80 з використанням СТНС складу 5%Si+5%B+90% вазелін, 4 – ЕІЛ ЕІ складу 90% ВК6 + 10% 1М, виготовленим методом ПМ, 5– ЕІЛ ЕІ з ніхромового дроту складу Х20Н80 з використанням СТНС складу 0,5%Si+0,5%B+59%BK6+40%+ вазелін, 6– ЕІЛ ЕІ з твердого сплаву ВК6 з використанням СТНС складу 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін.

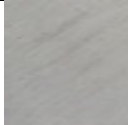
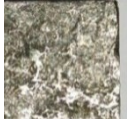
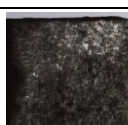
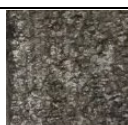
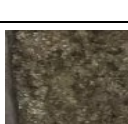
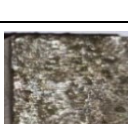
Аналіз ефективності процесу зношування показав, що зі збільшенням часу зношування, за рівні проміжки часу, поступово збільшується. Так для зразків без покриття і зразків з найменшим зносом з покриттям, нанесеним методом ЕІЛ за новою технологією, електродом з твердого сплаву ВК6 з використанням СТНС складу 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін знос по мірі збільшення часу за кожні 6 годин постійно збільшується і складає, відповідно, 103; 112; 129; 147 і 51; 53; 56; 61 мг.

Візуальний аналіз зразків показав, що після 24 годин випробувань під дією абразивних часток, зовнішній вигляд поверхонь зразків змінився. Поверхні всіх зразків з покриттями нанесеними методом ЕІЛ стали більш блискучими, а профіль шорсткості став меншим за розміром і більш покатым «розмитим». Колір зразка без покриття навпаки потемнів, що відбулось, очевидно, через появу слідів

абразивного зносу і забрудненням западин і інших недосконалостей, які виникли в результаті зношування (див. табл. 4.2).

В табл. 4.3 представлені результати дослідження зразків сталі Р6М5 без покриття і з покриттями, нанесеними методом ЕІЛ: електродами виготовленими методом ПМ, відповідно 1М і 90% ВК6 + 10% і за новою технологією, відповідно, компактним ЕІ з ніхромового дроту складу Х20Н80 з використанням СТС складу 5%Si+5%B+90% вазелін і складу 0,5%Si+0,5%B+59%BK6+40% вазелін, а також компактним ЕІ з твердого сплаву ВК6 і з використанням СТС складу 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін.

Таблиця 4.3 – Результати інтенсивності зношення зразків сталі Р6М5

№	Покриття	Час зношування, год				Зразок до зносу	Зразок після зносу
		6	12	18	24		
		Втрата ваги, мг					
1.	Без покриття.	61	124	192	268		
2.	Електродом 1М, виготовленим методом ПМ.	57	115	175	238		
3.	Електродом 90% ВК6 + 10% 1М, виготовленим методом ПМ.	53	108	167	234		
4.	Електродом з ніхромового дроту складу Х20Н80 з використанням СТС складу 5%Si+5%B+90% вазелін.	49	100	155	216		
5.	Електродом з ніхромового дроту складу Х20Н80 з використанням СТС складу 0,5%Si+0,5%B+59%BK6+40%+ вазелін.	45	92	143	200		
6.	Електродом з твердого сплаву ВК6 з використанням СТС складу 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін.	41	84	132	188		

На рис. 4.3 представлені графіки гідроабразивного зношування зразків сталі Р6М5 без покриття (1) і з покриттями, нанесеними методом ЕІЛ.

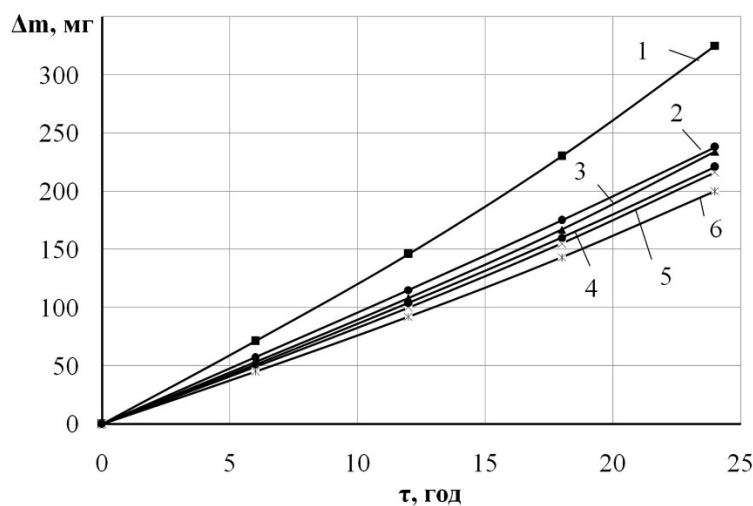


Рисунок 4.3 – Залежність гідроабразивного зносу (по втраті ваги) від часу випробування зразків сталі Р6М5: 1 – без покриття, 2 – ЕІ марки 1М, виготовленим методом ПМ, 3 – ЕІ складу 90% ВК6 + 10% 1М, виготовленим методом ПМ, 4 – ЕІ з ніхромового дроту марки Х20Н80 з використанням СТНС складу 5%Si+5%B+90% вазелін, 5 – ЕІ з ніхромового дроту марки Х20Н80 з використанням СТНС складу 0,5%Si+0,5%B+59%ВК6+40%+ вазелін, 6 – ЕІ з твердого сплаву ВК6 з використанням СТС складу 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін.

В результаті аналізу табл. 4.2 і рис. 4.2 встановлено, що кращою стійкістю проти гідроабразивного зносу володіють зразки сталі Р6М5 з покриттям нанесеним методом ЕІЛ ЕІ з твердого сплаву ВК6 з використанням СТНС складу 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін. Після 24 годин випробувань знос цих зразків складає 188 мг. Знос зразків з покриттям, нанесеним методом ЕІЛ ЕІ з ніхромового дроту марки Х20Н80 з використанням СТНС складу 0,5%Si+0,5%B+59%ВК6+40% вазеліні та СТНС складу 5%Si+5%B+90% вазелін, складає, відповідно, на ~ 6 і 15 % більше, тобто 200 і 216 мг, а з покриттями, нанесеними ЕІ виготовленим методом ПМ, складу 90% ВК6 + 10% 1М і марки 1М більше, відповідно, на ~ 24 і 27 %, тобто 234 і 238 мг. Найбільший знос у зразків без покриття, який складає 268 мг, що на 43 % більше ніж у зразка з покриттям, нанесеним методом ЕІЛ за новою технологією, ЕІ з твердого сплаву ВК6 з використанням СТНС складу 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін.

Аналіз ефективності процесу зношування показав, що зі збільшенням часу знос за рівні проміжки часу поступово збільшується. Так для зразків без покриття і зразків з найменшим зносом з покриттям, нанесеним методом ЕІЛ за новою технологією, електродом з твердого сплаву ВК6 з використанням СТНС складу $0,5\%Si+0,5\%B+2\%Cr+7\%Ni+90\%$ вазелін знос по мірі збільшення часу за кожні 6 годин постійно збільшується і складає, відповідно, 61; 63; 68; 76 і 41; 43; 48 і 56 мг.

Візуальний аналіз зразків показав, що після 24 годин випробувань під дією абразивних часток, зовнішній вигляд поверхонь зразків змінився. Поверхні всіх зразків з покриттями нанесеними методом ЕІЛ стали більш світлішими, а профіль шорсткості став меншим за розміром і більш покатым «розмитим». Колір зразка без покриття навпаки потемнів, що відбулось, очевидно через появу слідів абразивного зносу і забрудненням западин і інших недосконалостей, які виникли в результаті зношування (див. табл. 4.3).

4.1.2. Дослідження впливу покриттів складу 90% ВК6+10%1М і 1М на топографічні, міцнісні та пластичні властивості сталейних деталей

Методика досліджень

До топографічних властивостей металів відносять шорсткість та суцільність, до міцнісних межу міцності, межу текучості, а до пластичних відносне подовження та відносне звуження.

Згідно ДСТУ 7809, для дослідження впливу різних технологій зміцнення на фізико-механічні властивості деталі, були виготовлені зразки зі сталі 45 і сталі Р6М5 (рис. 4.4).



Рисунок 4.4 – Зразок для випробування на розрив.

Зміцнення виконувалось на установці ЕІЛ «Елітрон-52А» в два етапи:

1-й етап при $W_p = 2,6$ Дж і продуктивності, відповідно, $T=2,0$ см² /хв.;

2-й етап при $W_p = 0,13$ Дж і продуктивності, відповідно $T = 0,5$ см² /хв.

Режими обробки методом ЕІЛ і матеріал покриття наведені в табл. 4.4.

Після обробки методом ЕІЛ деякі зразки зі сталі 45 зміцнювали методом безабразивної ультразвукової фінішної обробки (БУФО).

Шорсткість вимірювали на профілографі-профілометрі мод. 201 заводу «Калібр» шляхом зняття та обробки профілограм.

До топографічних параметрів покриттів, сформованих методою ЕІЛ, слід віднести товщину, шорсткість і суцільність, а до механічних властивостей межу міцності, межу текучості, відносне подовження та відносне звуження деталі.

В табл. 4.5 представлені зведені дані результатів дослідження впливу різних технологій нанесення покриттів методом ЕІЛ і ЕІЛ+БУФО на топографію і механічні властивості деталей зі сталі 45 і Р6М5.

Таблиця 4.4 - Застосовувані методи обробки зразків при випробуванні на розрив

Матеріал зразка	Матеріал покриття	
Сталь 45	Електрод-інструмент	СТНС
	Виготовлений методом ПМ	Без покриття
		90% ВК6 + 10% 1М
		1М
	Х20Н80	5%Si+5%B+90% вазелін
		0,5%Si+0,5%B+59%BK6+40% вазелін
	твердий сплав ВК6	0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін
Сталь Р6М5	Виготовлений методом ПМ	Без покриття
		90% ВК6 + 10% 1М
		1М
	Х20Н80	5%Si+5%B+90% вазелін
		0,5%Si+0,5%B+59%BK6+40% вазелін
	твердий сплав ВК6	0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін

Таблиця 4.5 - Результатів дослідження впливу різних технологій, що зміцнюють на топографію і механічні властивості сталейних деталей

Метод нанесення покриття	Енергія розряду, Дж	Продуктивність, См ² /хв	Межа текучості, МПа	Межа міцності, МПа	Відносне подовження, %	Відносне звуження, %	Шорсткість, Ra	Суцільність, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
			± %					
Сталь 45								
Без покриття в нормалізованому стані	-	-	355	600	16	40	0,5	-
Електродом, виготовленим методом ПМ, складу 90% ВК6 + 10% 1М	2,6	2,0	315	552	18,0	41,0	6,5	70
			-12,7	-8,7	+12,5	+2,5		
	2,6+0,13	2,0+0,5	343	575	17,5	40,5	1,9	80
			-3,5	-4,9	+9,4	+1,3		
Електродом, виготовленим методом ПМ, складу 90% ВК6 + 10% 1М + БУФО	2,6+0,13	2,0+0,5	362	615	15,9	39,7	1,3	90
			+1,97	+2,5	-0,6	-0,8		
Електродом, виготовленим методом ПМ, складу 1М	2,6	2,0	320	563	18,0	41,0	6,3	60
			-10,9	-6,6	+12,5	+2,5		
	2,6+0,13	2,0+0,5	333	582	17,5	40,5	1,9	70
			-6,6	-3,1	+9,4	+1,3		
Електродом, виготовленим методом ПМ, складу 1М + БУФО	2,6+0,13	2,0+0,5	368	622	15,7	39,6	1,2	80
			+3,7	+3,7	-1,9	-1,0		
Електродом, виготовленим з дроту Х20Н80 з СТС, складу 5%Si +5%B+90% вазелін	2,6	2,0	325	569	18,0	41,0	6,1	70
			-9,2	-5,4	+12,5	+2,5		
	2,6+0,13	2,0+0,5	343	584	17,5	40,4	1,6	90
			-3,5	-2,7	+9,4	+1,0		
Електродом, виготовленим з дроту Х20Н80 з СТС, складу 5%Si +5%B+90% вазелін + БУФО	2,6+0,13	2,0+0,5	371	625	15,8	39,3	1,1	100
			+4,5	+4,2	-1,3	-1,8		
Електродом, виготовленим з дроту Х20Н80 з СТС, складу 0,5%Si + 0,5%B +59%BК6+40% вазелін	2,6	2,0	327	571	17,9	40,9	6,5	70
			-8,6	-5,0	+11,9	+2,3		
	2,6+0,13	2,0+0,5	345	585	17,5	40,4	1,8	90
			-2,9	-2,6	+9,4	+1,0		

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Електродом, виготовленим з дроту X20H80 з СТС, складу 0,5%Si + 0,5%B +59%BK6+40% вазелін + БУФО	2,6+0,13	2,0+0,5	371	627	15,7	39,6	1,2	100
			+4,5	+4,5	-1,9	-1,0		
Електродом, виготовленим з твердого сплаву BK6 з СТС складу 0,5%Si + 0,5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% вазелін	2,6	2,0	332	575	17,8	40,8	5,9	70
			-6,9	-4,3	+11,3	+0,2		
	2,6+0,13	2,0+0,5	349	588	17,5	40,4	1,5	95
			-1,7	-2,0	+9,4	+1,0		
Електродом, виготовленим з твердого сплаву BK6 з СТС складу 0,5%Si + 0,5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% вазелін + БУФО	2,6+0,13	2,0+0,5	375	630	15,7	39,6	1,0	100
			+5,6	+5,0	-1,9	-1,0		
Сталь P6M5								
Без покриття в нормалізованому стані Електродом, виготовленим методом ПМ, складу 90% BK6 + 10% 1M	-	-	510	850	12,0	14,0	0,5	-
	2,6	2,0	460	790	13,0	15,0	5,3	80
			-10,9	-7,6	+8,3	+7,1		
	2,6+0,13	2,0+0,5	480	819	12,7	14,7	2,0	90
			-6,3	-3,8	+5,8	+5		
Електродом, виготовленим методом ПМ, складу 90% BK6 + 10% 1M + БУФО	2,6+0,13	2,0+0,5	520	865	11,9	13,9	1,3	95
			+2,0	+1,8	-0,8	-0,7		
Електродом, виготовленим методом ПМ, складу 1M	2,6	2,0	455	797	13,0	15,0	5,3	80
			-12,1	-6,6	+8,3	+7,1		
	2,6+0,13	2,0+0,5	476	815	12,7	14,7	1,9	90
			-7,1	-4,3	+5,8	+5,0		
Електродом, виготовленим методом ПМ, складу 1M + БУФО	2,6+0,13	2,0+0,5	520	865	11,9	13,9	1,2	95
			+2,0	+1,8	-0,8	-0,7		
Електродом, виготовленим з дроту X20H80 з СТС, складу 5%Si +5%B+90% вазелін	2,6	2,0	465	810	13,0	15,0	5,3	80
			-9,7	-4,9	+8,3	+7,1		
	2,6+0,13	2,0+0,5	480	830	12,6	14,6	1,9	90
			-6,3	-2,4	+5,0	+4,3		
Електродом, виготовленим з дроту X20H80 з СТС, складу 5%Si +5%B+90% вазелін + БУФО	2,6+0,13	2,0+0,5	525	870	11,8	13,8	1,1	100
			+3,3	+2,4	-1,7	-1,4		
Електродом, виготовленим з дроту X20H80 з СТС, складу 0,5%Si + 0,5%B +59%BK6+40% вазелін	2,6	2,0	470	815	13,0	15,0	5,7	80
			-8,5	-4,3	+8,3	+7,1		
	2,6+0,13	2,0+0,5	490	835	12,6	14,6	1,9	90

1	2	3	4	5	6	7	8	9
			-4,1	-1,8	+5,0	+4,3		
Електродом, виготовленим з дроту X20H80 з СТС, складу 0,5%S+0,5%B+9%BK6+40%вазелін+БУ ФО	2,6+0,13	2,0+0,5	527	873	11,8	13,8	1,1	100
			+3,3	+2,7	-1,7	-1,4		
Електродом, виготовленим з твердого сплаву BK6 з СТС складу 0,5%Si + 0,5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% вазелін	2,6	2,0	472	817	12,9	14,9	5,9	80
			-8,1	-4,0	+7,5	+6,4		
	2,6+0,13	2,0+0,5	495	840	12,8	14,8	1,9	90
			-3,0	-1,2	+6,7	+5,7		
Електродом, виготовленим з твердого сплаву BK6 з СТС складу 0,5%Si + 0,5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% вазелін + БУФО	2,6+0,13	2,0+0,5	530	875	11,7	13,7	1,1	100
			+3,9	+2,9	-2,6	-2,2		

В результаті аналізу таблиці встановлено, що при ЕІЛ електродами-інструментами, виготовленими методом ПМ, зразків зі сталей 45 і Р6М5 супроводжується зниженням межі міцності і межі текучості, відповідно на 11,8 і 7,7 % і 11,5 і 7,1 %, а відносне подовження і відносне звуження зростає, відповідно ~ на 12,5 і 2,5% та 8,0 і 6,9%.

Слід відмітити, що електроіскрові покриття, підвищуючи одні експлуатаційні характеристики (ψ , δ), нерідко погіршують інші (σ_b , σ_T). Це можна пояснити наступним чином: нанесення методом ЕІЛ покриттів супроводжується збільшенням шорсткості поверхневого шару (з $Ra = 0,5$ до $Ra = 5,3-6,5$ мкм) і появи значної кількості концентраторів напружень, суцільність покриття складає 70-80 %. Також в поверхневому шарі виникають залишкові розтягувальні напруження.

При нанесенні зносостійких електроіскрових покриттів (ЕП), сформованих у два етапи, вплив негативних процесів значно менший. Так, шорсткість зменшується до $Ra = 1,9-2,0$ мкм, а суцільність покриття збільшується до 90 % і, як результат, межа міцності і межа текучості зменшується, для сталі 45 і сталі Р6М5, відповідно ~ на 5,1 і 4,0 та 2,7 і 2,4 %, а відносне подовження і відносне звуження зростає, відповідно ~ на 9,4 і 1,3% та 5,8 і 5,0 %.

При подальшій БУФО шорсткість поверхні становиться ще меншою ($Ra=1,9-2,0$ мкм), суцільність покриття збільшується до 95 %, а залишкові напруження стають стискаючими. В результаті межа міцності і межа плинності збільшуються, для сталі 45 і сталі Р6М5, відповідно ~ на 2,8 і 3,1 та 2,0 і 1,8 %, а відносне подовження і відносне звуження зменшуються, відповідно ~ на 1,3 і 0,9 % та 0,8 і 0,7 %.

Характер зміни механічних властивостей не змінюється при нанесенні зносостійких покриттів на сталь 45 і сталь Р6М5 за новою технологією з використанням електродів-інструментів з дроту Х20Н80 і твердого сплаву ВК6 та спеціальних технологічних насичуючих середовищ. Але, слід відмітити, що при нанесенні зносостійких ЕП, сформованих за новою технологією, як за один етап, так і в два етапи, зниження межі міцності і межі текучості значно менше, і складає, відповідно 8,2 і 4,9 та 2,7 і 2,4% і 8,8 і 4,4 та 4,5 і 1,8 %, а відносне подовження і відносне звуження зростає також менше, відповідно на 11,9 і 1,7 та 9,4 і 1,0 % та 8,0 і 6,9 та 5,6 і 4,8 %. При подальшій БУФО зростання межі міцності і межі текучості також збільшуються, для сталі 45 і сталі Р6М5, відповідно на 4,9 і 4,6 та 3,5 і 2,7 %, а відносне подовження і відносне звуження зменшуються, відповідно на 1,7 і 1,3 та 2,0 і 1,7 %. Шорсткість зменшується до $Ra=1,1$ мкм, а суцільність складає 100 %.

4.1.3. Дослідження впливу покриттів складу 90% ВК6+10%1М і 1М на топографічні та механічні властивості деталей з чавуну

До топографічних параметрів покриттів, сформованих методом ЕІЛ, слід віднести шорсткість і суцільність, а до механічних властивостей межу міцності, межу текучості, відносне подовження та відносне звуження деталі.

Методика досліджень

Для дослідження впливу методу ЕІЛ на механічні властивості деталі (межу міцності, межу текучості, відносне подовження та відносне звуження) були виготовлені зразки із високоміцного чавуну ВЧ 50, відповідно до ДСТУ 7809 (рис. 4.4).

Для кожного матеріалу електроду-інструменту і режиму ЕІЛ виготовляли по 3 зразки. Окремі зразки після нанесення методом ЕІЛ покриття додатково піддавались БУФО.

В табл. 4.6 представлені зведені дані результатів дослідження впливу різних технологій нанесення покриттів методом ЕІЛ і ЕІЛ + БУФО на топографію (шорсткість і суцільність), а в табл. 4.7 на механічні властивості (межу міцності, (σ_B), межу плинності (σ_T) і відносне подовження, (δ) деталей з високоміцного чавуну ВЧ 50.

Таблиця 4.6 - Результати дослідження впливу різних технологій нанесення на топографію (шорсткість і суцільність) покриттів, нанесених методом ЕІЛ і ЕІЛ+БУФО

Матеріал ЕІ	Склад СТНС, %	Шорсткість, Ra, мкм		Суцільність, S, %	
		До БУФО	Після БУФО	До БУФО	Після БУФО
1	2	3	4	5	6
Енергія розряду $W_p = 0,55$ Дж					
90%BK6+10%1M	-	3,2	0,7	60	70
1M	-	3,3	0,8	80	90
BK6	0,5Si+0,5B+2Cr+7Ni+90 вазелін	3,3	0,8	95	100
ніхром X20H80	5% Si+ 5% B+90% вазелін	3,5	0,7	90	95
Енергія розряду $W_p = 1,3$ Дж					
90%BK6+10%1M	-	3,7	0,8	55	65
1M	-	3,9	0,8	70	80
BK6	0,5Si+0,5B+2Cr+7Ni+90 вазелін	4,2	0,9	85	95

ніхром Х20Н80	5% Si+ 5% В+90% вазелін	4,3	0,9	80	90
Енергія розряду $W_p = 2,6$ Дж					
90%ВК6+10%1М	-	5,4	1,1	50	60
1М	-	5,7	1,1	60	70
ВК6	0,5Si+0,5В+2Cr+7Ni+90 вазелін	5,9	1,1	75	85
ніхром Х20Н80	5% Si+ 5% В+90% вазелін	6,1	1,2	70	80
Енергія розряду $W_p = 3,4$ Дж					
90%ВК6+10%1М	-	6,0	1,2	45	55
1М	-	6,3	1,3	55	65
ВК6	0,5Si+0,5В+2Cr+7Ni+90 вазелін	6,7	1,4	70	80
ніхром Х20Н80	5% Si+ 5% В+90% вазелін	7,5	1,5	65	75

При аналізі таблиць 4.6 і 4.7 було визначено, що ЕІЛ ЕІ складу 90% ВК6+10% 1М і 1М, виготовленими методом ПМ, зразків з високоміцного чавуну при енергії розряду $W_p = 0,55$ Дж і продуктивності, $Q = 0,67$ см²/хв супроводжується зниженням межі плинності (σ_T) і межі міцності (σ_B), відповідно на 32,0 і 32,78 % і 34,0 і 28,7 %, а відносне подовження (δ), при цьому, зростає на 5,71 і 5,43%.

Слід відмітити, що при ЕІЛ, коли підвищується параметр (δ), нерідко погіршують значення σ_B і σ_T . Це пояснюється наступним чином. Нанесення методом ЕІЛ покриттів супроводжується збільшенням шорсткості поверхневого шару (з $R_a = 0,5$ до $R_a = 3,2$ і $3,3$ мкм) і виникненням значних концентраторів напружень, а суцільність покриття складає, відповідно 60 і 80 % (табл. 4.6). Також в поверхневому шарі виникають залишкові розтягувальні напруження.

Таблиця 4.7 - Результати дослідження впливу різних технологій нанесення покриттів на механічні властивості деталей з високоміцного чавуну ВЧ 50

Метод нанесення покриття	Енергія розряду, Дж	Продуктивність, См ² /хв	Межа плинності, МПа	Межа міцності, МПа	Відносне подовження, %
1	2	3	4	5	6
Без покриття	-	-	320	500	7
Електродом, виготовленим методом ПМ, складу 90% ВК6 + 10% 1М	0,55	0,67	217,6	330	7,40
			-32,0	-34,0	+5,71
Електродом, виготовленим методом ПМ, складу (90% ВК6 + 10% 1М) + БУФО	0,55	0,67	325	512	6,92
			+1,56	+2,40	-1,16
Електродом, виготовленим методом ПМ, складу 1М	0,55	0,67	241	356,5	7,38
			-32,78	-40,25	+5,43
Електродом, виготовленим методом ПМ, складу 1М + БУФО	0,55	0,67	324,1	526,5	6,85
			+1,28	+5,30	-2,14
Електродом, виготовленим з дроту Х20Н80 з СТНС, складу 5%Si + 5%B + 90% вазелін	0,55	0,67	253,3	375,5	7,20
			-26,3	-33,16	+2,86
Електродом, виготовленим з дроту Х20Н80 з СТНС, складу 5%Si + 5%B + 90% вазелін + БУФО	0,55	0,67	341,1	538,2	6,72
			+6,59	+7,64	-4,0
Електродом, виготовленим з твердого сплаву ВК6 з СТНС складу 0,5%Si + 0,5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% вазелін	0,55	0,67	250,1	374,3	7,25
			-21,87	-33,58	+3,57
Електродом, виготовленим з твердого сплаву ВК6 з СТНС складу 0,5%Si + 0,5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% вазелін + БУФО	0,55	0,67	335,4	532,1	6,79
			+4,81	+6,62	-3,0
Електродом, виготовленим методом ПМ, складу 90% ВК6 + 10% 1М	1,3	1,0	211,3	375,3	7,15
			-51,44	53,70	+2,14

Електродом, виготовленим методом ПМ, складу (90% ВК6 + 10% 1М) + БУФО	1,3	1,0	321	506	6,89
			+0,31	+1,20	-1,6
Електродом, виготовленим методом ПМ, складу 1М	1,3	1,0	225,7	349,2	7,17
			-41,78	-43,18	+2,42
Електродом, виготовленим методом ПМ, складу 1М + БУФО	1,3	1,0	321,5	507,1	6,81
			+0,47	+1,42	-2,79
Електродом, виготовленим з дроту Х20Н80 з СТС, складу 5%Si + 5%B + 90% вазелін	1,3	1,0	243,3	363,9	7,20
			-31,52	-37,4	+2,86
Електродом, виготовленим з дроту Х20Н80 з СТС, складу 5%Si + 5%B + 90% вазелін + БУФО	1,3	1,0	325,1	509,8	6,75
			+1,59	+1,96	-3,70
Електродом, виготовленим з твердого сплаву ВК6 з СТС складу 0,5%Si + 0,5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% вазелін	1,3	1,0	245,3	354,2	7,18
			-30,45	-1,16	+2,57
Електродом, виготовленим з твердого сплаву ВК6 з СТС складу 0,5%Si + 0,5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% вазелін + БУФО	1,3	1,0	324,4	508,5	6,59
			+1,38	+1,7	-3,24
Електродом, виготовленим методом ПМ, складу 90% ВК6 + 10% 1М	3,4	2,0	205,3	321,2	7,17
			-55,86	-5,67	+2,43
Електродом, виготовленим методом ПМ, складу (90% ВК6 + 10% 1М) + БУФО	3,4	2,0	320,5	502,1	6,92
			+0,16	+0,42	-1,16
Електродом, виготовленим методом ПМ, складу 1М	3,4	2,0	211,4	325,2	7,18
			-51,37	-5,04	+2,57
Електродом, виготовленим методом ПМ, складу 1М + БУФО	3,4	2,0	320,9	503,6	6,83
			+0,28	+0,72	-1,01
Електродом, виготовленим з дроту Х20Н80 з СТНС, складу 5%Si + 5%B + 90% вазелін	3,4	2,0	223,3	331,4	7,19
			-43,30	-0,86	+2,86
	3,4	2,0	323,1	505,8	6,89

Електродом, виготовленим з дроту Х20Н80 з СТНС, складу 5%Si + 5%B + 90% вазелін + БУФО			+0,97	+1,16	-1,60
Електродом, виготовленим з твердого сплаву ВК6 з СТНС складу 0,5%Si + 0,5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% вазелін	3,4	2,0	221,7	330,3	7,19
			-44,34	-1,38	+2,71
Електродом, виготовленим з твердого сплаву ВК6 з СТНС складу 0,5%Si + 0,5%B + 2%Cr + 7%Ni + 90% вазелін + БУФО	3,4	2,0	322,8	504,9	6,91
			+0,86	+0,98	-1,30

Після проведення ЕІЛ і обробки БУФО ЕІ складу 90% ВК6 + 10% 1М і 1М, шорсткість покриття зменшується, відповідно, до $R_a = 0,7$ і $0,8$ мкм, а суцільність збільшується, відповідно, до 70 і 90 %. В результаті межа плинності і межа міцності збільшуються, відповідно до 325 і 324,1 та 512 і 526 %, а відносне подовження зменшується, відповідно до 1,16 і 2,14 %. Шорсткість поверхні зменшується до $R_a = 0,8$ і $0,7$ мкм, а суцільність збільшується і складає 70 і 90 % (табл. 4.6).

Характер зміни механічних властивостей не змінюється при нанесенні методом ЕІЛ зносостійких покриттів на зразки з високоміцного чавуну ВЧ50 з використанням ЕІ з дроту Х20Н80 і твердого сплаву ВК6 та спеціальних технологічних насичуючих середовищ, відповідно складу 5%Si+5%B+90% вазелін та твердого сплаву ВК6 з СТНС складу 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін. В даному випадку зниження межі плинності і межі міцності менше, і складає, відповідно 26,3 і 21,87 та 33,16 і 33,58%, а відносне подовження зростає також менше і складає 2,86 і 3,57 %. При подальшій БУФО зростання межі плинності і межі міцності також збільшуються, відповідно до 341,1 і 335,4 та 538,2 і 532,1 %, а відносне подовження зменшуються, відповідно на 4,0 і 3,0 %. Шорсткість поверхні зменшується до $R_a = 0,8$ і $0,7$ мкм, а суцільність складає, відповідно 100 і 95 % (табл. 4.6).

При збільшенні енергії розряду до $W_p = 1,3$ і $3,4$ Дж і продуктивності ЕІЛ, відповідно до $Q = 1,0$ і $2,0$ см²/хв характер зміни межі плинності, (σ_t), межі міцності (σ_b) і відносного подовження(δ) не змінюється. Межа плинності і межа міцності зменшуються по мірі зростання W_p і Q . При використанні компактних ЕІ складу 90%ВК6+10%1М, 1М, виготовлених методом ПМ та ЕІ з твердого сплаву ВК6 і ніхромового дроту Х20Н80 з використанням СТНС, межа плинності зменшується при $W_p = 1,3$ Дж до: 211,3; 225,7 МПа, а при $W_p = 3,4$ Дж до 205,3 і 211,4 МПа, межа міцності зменшується при $W_p = 1,3$ Дж до 375,3 і 349,2 МПа, а при $W_p = 3,4$ Дж до 321,2 і 325,2 МПа, відносне подовження, при цьому, збільшується, відповідно до: 7,15 і 7,17 та 7,20 і 7,18 %.

Шорсткість поверхневого шару покриття збільшується, відповідно при $W_p=1,3$ Дж і продуктивності ЕІЛ $Q = 1,0$ см²/хв до $R_a = 3,7; 3,9; 4,2$ і $4,3$ мкм, а при $W_p = 3,4$ Дж і продуктивності ЕІЛ $Q = 2,0$ см²/хв до $R_a = 6,0; 6,3; 6,7$ і $7,5$ мкм а суцільність (S) зменшується і складає при $W_p=1,3$ Дж і продуктивності ЕІЛ $Q = 1,0$ см²/хв до $S = 55; 70; 85$ і 80 %, а при $W_p = 3,4$ Дж і продуктивності ЕІЛ $Q = 2,0$ см²/хв до $S = 45; 50; 70$ і 65 % (табл. 4.6).

Після наступної БУФО межа плинності збільшується при $W_p=1,3$ Дж до: 321; 321,5, а при $W_p = 3,4$ Дж до 325,1 і 324,4 МПа, межа міцності, при цьому, збільшується при $W_p=1,3$ Дж до: 506; 507,1, а при $W_p = 3,4$ Дж до 509,8 і 508,5 МПа, відносне подовження, при цьому, зменшується, відповідно до: 6,89 і 6,81 та 6,75 і 6,59 %. Шорсткість покриття зменшується при $W_p=1,3$ Дж до $0,8; 0,8; 0,9$ і $0,9$, а при $W_p = 3,4$ Дж до $R_a = 1,2; 1,3; 1,4$ і $1,5$ мкм, а суцільність збільшується, відповідно до 60, 75, 85 і 80 та 55, 65, 80 і 75 %.

4.2. Новий спосіб захисту сталевих деталей від гідроабразивного зносу екологічно безпечними технологічними методами

Методика досліджень

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

1. Відповідно до [13], залежно від навколишнього середовища застосовують такі матеріали ротора та кожуха центрифуг для очищення стічних вод, які в процесі роботи підлягають дуже великому гідроабразивному зношуванню:

1) нелеговані чорні метали: допускається обробка при температурі до 45⁰С суспензій, що містять нейтральні та лужні солі, такі як нітрати натрію, кадмію, барію; анілінові барвники, солі кремнієвої, миш'якової та миш'яковистої кислот; сульфати та гідросульфати натрію, кальцію, магнію, цинку, барію, кальцію, кадмію;

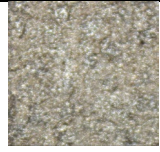
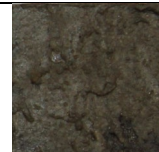
2) корозійностійка сталь 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632-72), крім суспензій, перерахованих вище, допускається обробка при температурі не вище 70⁰С також суспензій, що містять: гідросульфат натрію, калію, кальцію; броміди та йодиди натрію та калію (до 30⁰С і до 10% мас.); солі міді всіх кислот, крім соляної; саліцилову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

Таким чином, для досліджень були обрані сталь 45 і корозійно-стійка нержавіюча сталь 12Х18Н10Т з яких виготовляли зразки розміром 15х15х8 мм, які підлягали ЦЕІЛ і наступному алітуванню методом ЕІЛ алюмінієвим електродом-інструментом і наступним легуванням електродом-інструментом з композиційного зносостійкого матеріалу 90%ВК6+10%1М на установці моделі «Елітрон-52А» (табл. 4.8).

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

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

Таблиця 4.8 - Зразки сталі 45 і сталі 12Х18Н10Т для порівняльних випробувань проти гідроабразивного зношування

№ зразка	Вид зміцнення	Зображення	
		Сталь 45	Сталь 12Х18Н10Т
1	Без покриття		
2	ЦЕІЛ → ЕІЛАІ → ЕІЛТ15К6 → обкатка кулькою (ОК) → МПМ (армований ВК6).		
3	ЦЕІЛ → ЕІЛАІ → ЕІЛ (90%ВК6+ 10%1М).		
4	ЦЕІЛ → ЕІЛАІ → ЕІЛ (90%ВК6+ 10%1М) → МПМ, армований порошком 80%WC		
5	ЦЕІЛ → ЕІЛАІ → ЕІЛ (90%ВК6+ 10%1М) → МПМ, армований порошком 80%ZrN.		
6	ЦЕІЛ → ЕІЛАІ → ЕІЛ (90%ВК6+ 10%1М) → МПМ, армований порошком 40%WC+ 40%ZrN.		

Порошки WC, ZrN та їх суміші додають в двокомпонентну епоксидну систему, наповнену феросиліконом марки Loctite 3478 в різних співвідношеннях (табл. 4.8):

- варіант 1: концентрація армувальної речовини WC становить ~ 80%;
- варіант 2: концентрація армувальної речовини ZrN становить ~ 80%;
- варіант 3: концентрація армувальної речовини суміші порошків WC + ZrN, становить 40% WC+40% ZrN.

Апробацію способу формування комбінованих електроерозійних покриттів виконували на зразках з вуглецевої конструкційної якісної сталі 45 ферито-перлітного класу та жароміцної, корозійностійкої конструкційної з аустенітною кристалічною структурою сталі 12Х18Н10Т.

Для проведення порівняльних досліджень проти гідроабразивного зносу виготовляли сталеві зразки, розміром 15х15х8мм, на які наносили покриття електродами-інструментами на установці "Елітрон-52А" згідно з № 3-6 (табл. 4.8).

Для порівняння стійкості зразків проти гідроабразивного зносу використовували зразки з сталі 45 і сталі 12Х18Н10Т з покриттям, сформованим, згідно з прототипом №2 (табл. 4.8). При цьому електроіскрове легування шліфованої поверхні виконували на установці "Елітрон-52А" графітовим електродом МПГ-7 при енергії розряду $W_p=3,4$ Дж. Далі на цій же установці проводили алітування цементованого шару алюмінієвим електродом (три проходи при $W_p=3,4$ Дж) і нанесення покриття електродом з твердого сплаву Т15К6, виконуючи два проходи при $W_p=0,9$ Дж і два проходи при $W_p=3,4$ Дж.

Поверхнево-пластичну деформацію виконували за три проходи методом обкатки кулькою з питомим зусиллям вигладжування $P=2500$ МПа.

На покриття з твердого сплаву Т15К6, ретельно втираючи, наносили МПМ, попередньо армований порошком у вигляді твердосплавної суміші ВК6, доданої в двокомпонентну епоксидну систему, наповнену ферросиліконом марки Loctite 3478 при концентрації армуючої речовини $\sim 60\%$. Після полімеризації шар МПМ шліфували до виступів шорсткості покриття з твердого сплаву Т15К6.

Нанесення електроіскрового покриття на зразки №3-6 (табл. 4.8) після ЦЕІЛ і алітування методом ЕІЛ виконували електродом-інструментом з композиційного зносостійкого матеріалу 90%ВК6+10%1М на установці "Елітрон-52А" при $W_p=3,4$ Дж. На покриття з композиційного зносостійкого матеріалу 90%ВК6+10%1М, ретельно втираючи, наносили МПМ, попередньо армований порошком у вигляді карбіду вольфраму № 4, нітриду цирконію №5 і їх суміші №6, (табл. 4.8), доданих в двокомпонентну епоксидну систему, наповнену ферросиліконом марки Loctite 3478 при концентрації армуючої

речовини, відповідно $\sim 80\% \text{ WC}$; $80\% \text{ ZrN}$ і $40\% \text{ WC}+40\% \text{ ZrN}$. Частину шару металополімерного матеріалу видаляли шліфуванням до виступів шорсткості покриття з композиційного зносостійкого матеріалу $90\% \text{ BK6}+10\% \text{ 1M}$.

Слід відмітити, що композиційний зносостійкий матеріал $90\% \text{ BK6}+10\% \text{ 1M}$ можна наносити при енергії розряду, $W_p=0,13-3,4$ Дж. Зменшення енергій розряду нижче $W_p=0,13$ Дж недоцільно в зв'язку з низькою продуктивністю. Збільшення енергій розряду вище ніж $W_p=3,4$ Дж призводить до різкого зниження суцільності покриття.

Для проведення випробувань зразків на зносостійкість проти гідроабразивного зношування використовували методику досліджень описану вище в підрозділі 4.1.

Результати досліджень

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

Оцінка гідроабразивної зносостійкості зразків із сталі 45

В результаті проведених досліджень встановлено, що найінтенсивніше зношуються зразки без покриття (рис. 4.5, табл. 4.9).

Зразки №6 з покриттям, сформованим в послідовності: ЦЕІЛ $\rightarrow$ ЕІЛАІ $\rightarrow$ ЕІЛ ($90\% \text{ BK6}+10\% \text{ 1M}$) $\rightarrow$ МПМ ($80\% \text{ ZrN}$), знос яких на $76,7\%$ менше зразків без покриття, на $39,5\%$ менше в порівнянні з прототипом (№2) і, відповідно, на $9,3$ (№5) і на $16,3$ (№4) %, менше сформованих в послідовності ЦЕІЛ $\rightarrow$ ЕІЛАІ $\rightarrow$ ЕІЛ ($90\% \text{ BK6}+10\% \text{ 1M}$) $\rightarrow$ МПМ ($40\% \text{ WC}+40\% \text{ ZrN}$) і ЦЕІЛ $\rightarrow$ ЕІЛАІ $\rightarrow$ ЕІЛ ($90\% \text{ BK6}+10\% \text{ 1M}$) $\rightarrow$ МПМ ($80\% \text{ WC}$).

Оцінка гідроабразивної зносостійкості зразків із сталі 12X18H10T

При проведенні порівняльних досліджень зразків із сталі 12X18H10T на гідроабразивний знос протягом 24 годин характер розподілу їх за ранжиром, згідно з стійкістю проти гідроабразивного зносу співпадає зі зносом зразків зі сталі 45. Тут також найінтенсивніше зношуються зразки без покриття (рис. 4.6, табл. 4.10).

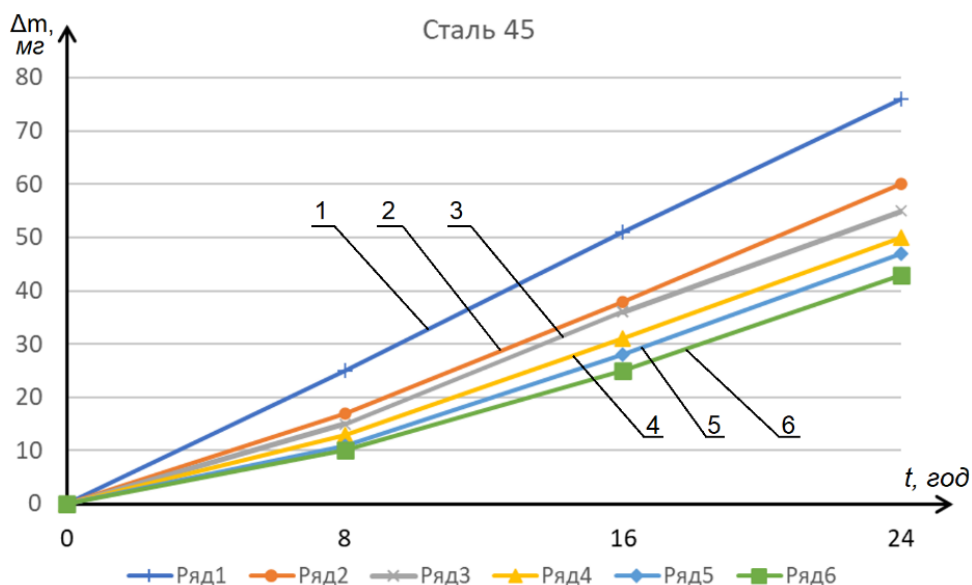


Рисунок 4.5 – Результати гідроабразивного зношування зразків зі сталі 45 з різними покриттями: №1-6, згідно таблиці 4.8.

Таблиця 4.9- Результати досліджень гідроабразивного зношування зразків зі сталі 45 з різними покриттями

№ зразка	Вид покриття	Величина зносу, Δm , мг		
		8 год	16 год	24 год
1	Без покриття	25	51	76
2	ЦЕІЛ → ЕІЛАІ → ЕІЛТ15К6 → обкатка кулькою (ОК) → МПМ (ВК6) → ПД	17	38	60
3	ЦЕІЛ → ЕІЛАІ → ЕІЛ (90%ВК6+ 10%1М)	15	36	55
4	ЦЕІЛ → ЕІЛАІ → ЕІЛ (90%ВК6+ 10%1М) → МПМ (80% WC)	13	31	50
5	ЦЕІЛ → ЕІЛАІ → ЕІЛ (90%ВК6+ 10%1М) → МПМ (40%WC+ 40%ZrN)	11	28	47
6	ЦЕІЛ → ЕІЛАІ → ЕІЛ (90%ВК6+10%1М) → МПМ (80% ZrN)	10	25	43

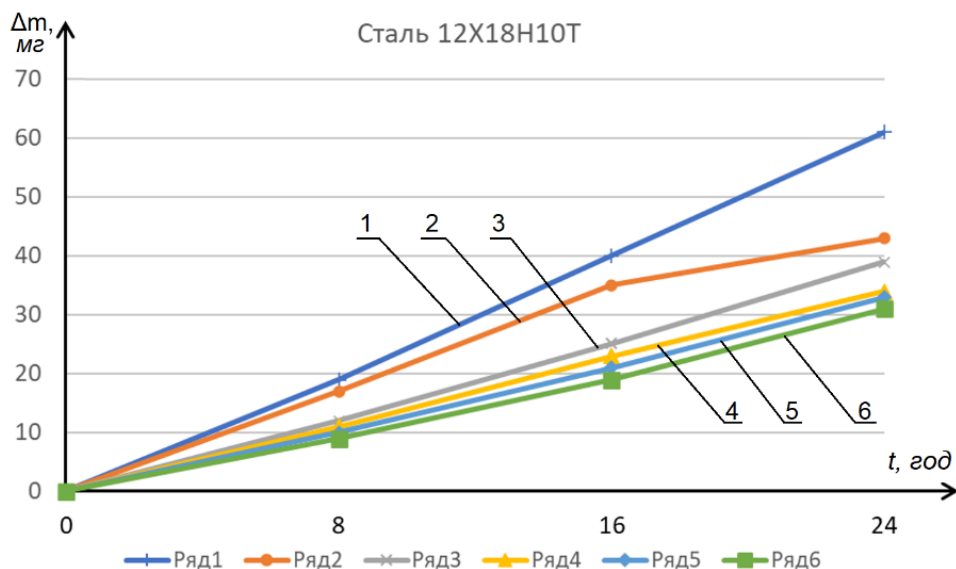


Рисунок 4.6 - Результати гідроабразивного зношування зразків зі сталі 12X18H10T з різними покриттями: №1-6, згідно таблиці 3.

Таблиця 4.10 - Результати досліджень гідроабразивного зношування зразків зі сталі 12X18H10T з різними покриттями

№ зразка	Вид покриття	Величина зносу, Δm , мг		
		8 год	16 год	24 год
1	Без покриття	19	40	61
2	ЦЕІЛ → ЕІЛАІ → ЕІЛТ15К6 → обкатка кулькою (ОК) → МПІМ (ВК6) → ПД	17	35	43
3	ЦЕІЛ → ЕІЛАІ → ЕІЛ (90%ВК6+10%1М)	12	25	39
4	ЦЕІЛ → ЕІЛАІ → ЕІЛ (90%ВК6+10%1М) → МПІМ (80% WC)	11	23	34
5	ЦЕІЛ → ЕІЛАІ → ЕІЛ (90%ВК6+10%1М) → МПІМ (40%WC+ 40%ZrN)	10	21	33
6	ЦЕІЛ → ЕІЛАІ → ЕІЛ (90%ВК6+10%1М) → МПІМ (80% ZrN)	9	19	31

Для сталі 12X18H10T найкращі результати з гідроабразивної зносостійкості показали зразки з покриттям, сформованим в послідовності: ЦЕІЛ → ЕІЛАІ → ЕІЛ (90%ВК6+ 10%1М) → МПМ (80% ZrN), знос яких на 96,7% менше зразків без покриття, на 38,7% менше в порівнянні з аналогом і, відповідно, на 6,5 і на 9,7%, менше сформованих в послідовності ЦЕІЛ → ЕІЛАІ → ЕІЛ (90%ВК6+10%1М) → МПМ (40%WC+40%ZrN) і сформованим в послідовності ЦЕІЛ → ЕІЛАІ → ЕІЛ (90%ВК6+10%1М) → МПМ (80% WC).

4.3. Новий спосіб захисту чавунних деталей від гідроабразивного зносу екологічно безпечними технологічними методами

Методика досліджень

Апробацію запропонованої технології формування комбінованих електроіскрових покриттів, виконували на зразках з ВЧ з кулястим графітом ВЧ60. Для проведення порівняльних досліджень проти гідроабразивного зносу виготовляли чавунні зразки, розміром 15x15x8 мм, на які наносили покриття електродами-інструментами на установці "Елітрон-52А" згідно з №3-6 (табл. 4.11).

Таблиця 4.11- Зразки з ВЧ60 для порівняльних досліджень проти гідроабразивного зношування

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

* зразок №2 зі сталі 12X18H10T.

Для порівняння стійкості зразків проти гідроабразивного зносу використовували зразки зі сталі 12X18H10T, з покриттям, сформованим, згідно з прототипом (№2, табл. 4.11). При цьому ЕІЛ шліфованої поверхні виконували на установці "Елітрон-52А" графітовим електродом МПГ-7 при енергії розряду $W_p=3,4$ Дж. Далі на цій же установці проводили алітування цементованого шару алюмінієвим електродом (три проходи при $W_p=3,4$ Дж) і нанесення покриття електродом з твердого сплаву Т15К6, виконуючи два проходи при $W_p=0,9$ Дж і два проходи при $W_p=3,4$ Дж. ОК виконували за три проходи з питомим зусиллям вигладжування $P=2500$ МПа.

На покриття з твердого сплаву Т15К6, ретельно втираючи, наносили МПМ, попередньо армований порошком у вигляді твердосплавної суміші ВК6, доданої в двокомпонентну епоксидну систему, наповнену феросиліконом марки Loctite 3478 при концентрації армуючої речовини $\sim 60\%$. Після полімеризації шар МПМ шліфували до виступів шорсткості покриття з твердого сплаву Т15К6.

Нанесення КЕП на шліфовані поверхні чавунних зразків №3-6 (табл. 4.11) виконували на установці "Елітрон-52А" алюмінієвим електродом (три проходи при $W_p=3,4$ Дж) і ЕІ з композиційного зносостійкого матеріалу 90%ВК6+10%1М. На покриття складу 90%ВК6+10%1М, нанесене методом ЕІЛ, ретельно втираючи, наносили МПМ, попередньо армований порошком WC (№4, табл. 4.11), ZrN (№5, табл. 4.11) і їх суміші (№6, табл. 4.11), доданих в двокомпонентну епоксидну систему, наповнену феросиліконом марки Loctite 3478 при концентрації армуючої речовини, відповідно $\sim 80\%$ WC; 80% ZrN і 40% WC+40% ZrN. Частину шару металополімерного матеріалу видаляли шліфуванням до виступів шорсткості покриття з композиційного зносостійкого матеріалу 90%ВК6+10%1М.

Для проведення випробувань зразків на зносостійкість проти гідроабразивного зношування використовували методику представлену вище в підрозділах 4.1 і 4.2.

Результати досліджень

При проведенні порівняльних досліджень зразків з високоміцного чавуну ВЧ60 на гідроабразивний знос, встановлено, що найінтенсивніше зношуються зразки без покриття (табл. 4.12, рис. 4.7).

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

Таблиця 4.12 - Результати досліджень гідроабразивного зношування зразків з високоміцного чавуну ВЧ60 з різними покриттями

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

* - зразок №2 зі сталі 12Х18Н10Т.

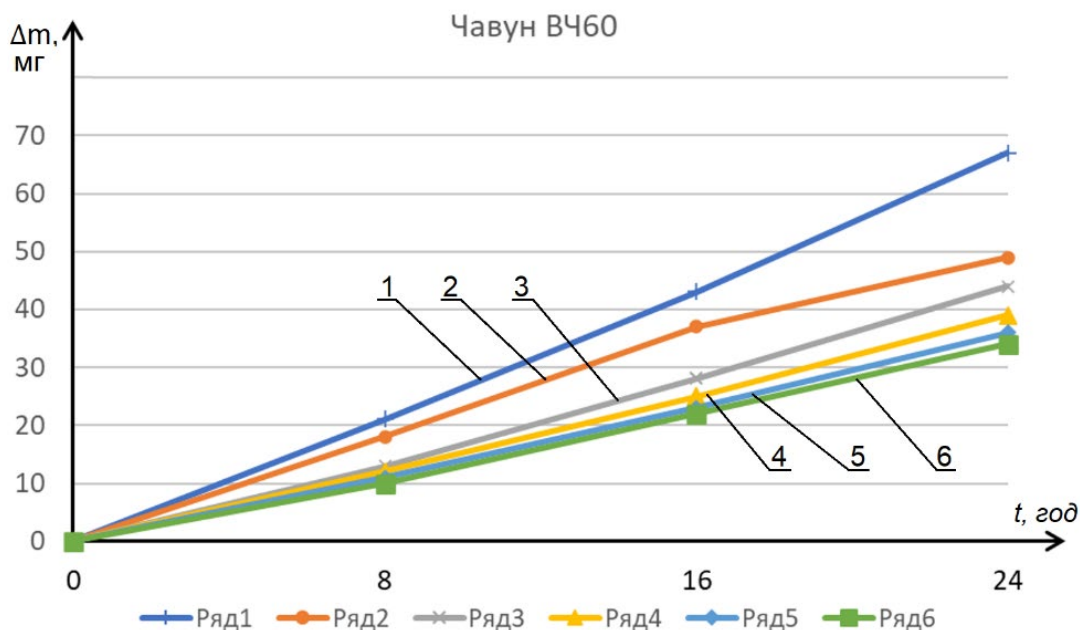


Рисунок 4.7 - Результати досліджень гідроабразивного зношування зразків з високоміцного чавуну ВЧ60 (№3-6) і сталі 12Х18Н10Т (№2) з різними покриттями: 1 - без покриття; 2 - ЦЕІЛ → ЕІЛАІ → ЕІЛТ15К6 → ОК → МПМ (ВК6) → ПД; 3 - ЕІЛАІ → ЕІЛ (90%ВК6 + 10%1М); 4 – ЕІЛАІ → ЕІЛ (90%ВК6+ 10%1М) → МПМ (80% WC); 5 - ЕІЛАІ→ЕІЛ (90%ВК6+10%1М) → МПМ (40%WC+ 40%ZrN); 6 - ЕІЛАІ→ЕІЛ (90%ВК6+10%1М) →МПМ (80% ZrN).

4.4. Розрахунок економічного ефекту розроблених технологічних рішень для впровадження в виробництво

4.4.1. Модифікація технології деталей, що працюють в умовах гідроабразивного зношування

В даній роботі пропонується ввести наступні зміни в технологічні процеси виготовлення відповідальних деталей, що працюють в умовах гідроабразивного зношування. Розглянемо на прикладі захисної втулки.

Формування КЕП на робочих поверхнях ЗВ, що піддаються гідроабразивному зношуванню, відбувається в наступній послідовності:

- 1) формування методом ЕІЛ композиційного зносостійкого шару;

2) безабразивна ультразвукова фінішна обробка (БУФО);

4.4.2. Визначення собівартості основних операцій ЕІЛ втулки

Для визначення собівартості виконання додаткових технологічних операцій, необхідно визначити суми всіх витрат, що пов'язані з їх виконанням.

$$C_{EIL} = \sum C_i \quad (4.1)$$

де C_i – складові елементи собівартості технологічних операцій.

Основні складові собівартості:

- заробітна платня працівників;
- вартість витратних матеріалів;
- вартість основних засобів;
- вартість електроенергії.

Визначаємо розмір видатків на зарплатню робітникам, які складаються з прямої зарплатні та відрахування єдиного соціального внеску (ЄСВ), які можуть бути визначеними за допомогою формули:

$$C_{ЗП} = T_{шт-к} \cdot C_z (1 + K_{ЕСВ}) \quad (4.2)$$

де $T_{шт-к}$ – норма штучно-калькуляційного часу, год;

$C_z = 210$ грн/год – годинна тарифна ставка робітника;

$K_{ЕСВ} = 0,22$ – величина відрахувань ЄСВ, 22%.

Виконаємо нормування додатково призначених технологічних операцій, відповідно до методики, що використовується на ТОВ «ТРІЗ ЛТД».

Норма штучно-калькуляційного часу, що необхідно для виконання операції, може бути визначено визначається за формулою, год:

$$T_{шт-к} = (T_{EIL} + T_{БУФО}) + T_D + T_{Обс} + T_{Від} + T_{П.З.} \quad (4.3)$$

де T_O – норма основного часу проведення операції, яка включає час на виконання ЕІЛ деталі (T_{EIL}) та час на виконання БУФО ($T_{БУФО}$), год,;

$$T_O = T_{EIL} + T_{БУФО} \quad (4.4)$$

T_D – норма допоміжного часу проведення операції, год.;

$T_{Обс}$ – норма часу, що витрачається на обслуговування робочого місця, %;

$T_{\text{відп}}$ – норма часу, що передбачено на відпочинок робітника, %;

$T_{\text{п.з.}}$ – норма підготовчо–заключного часу, год.

Норма основного часу операції електроіскрового легування $T_{\text{ЕЛЛ}}$, може бути визначено за допомогою формули, год:

$$T_{\text{ЕЛЛ}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot b}{6000 \cdot G} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 40 \cdot 180}{6000 \cdot 25} = 0,301, \quad (4.5)$$

де $r = 40$ мм – величина радіусу поверхні, що обробляється;

$b = 180$ мм – довжина втулки, мм;

$G = 25$ см²/хв – значення продуктивності використовуваної механізованої установки електроерозійного легування «Елітрон-52А».

Норму основного часу на операцію БУФО $T_{\text{БУФО}}$ визначаємо за формулою:

$$T_{\text{БУФО}} = \frac{L}{60 \cdot n \cdot S_o} = \frac{180}{60 \cdot 80 \cdot 0,2} = 0,188 \text{ год}, \quad (4.6)$$

де $L=180$ мм – довжина оброблюваної втулки;

$n=80$ об/хв – частота обертання втулки при проведенні обробки;

$S=0,2$ мм/об – величина повздовжньої подачі інструмента.

Допоміжний час при виконанні легування виробів нормується в розмірі 20% від норми основного часу, год:

$$T_{\text{д}} = 0,2 \cdot (T_{\text{ЕЛЛ}} + T_{\text{БУФО}}) = 0,2 \cdot (0,301 + 0,188) = 0,098 \text{ год}. \quad (4.7)$$

Норму часу для обслуговування робочого місця призначають в розмірі 4% від суми основного часу та допоміжного, год:

$$T_{\text{Обс}} = 0,04 \cdot ((T_{\text{ЕЛЛ}} + T_{\text{БУФО}}) + T_{\text{д}}) = 0,04 \cdot ((0,301 + 0,188) + 0,098) = 0,023 \text{ год}. \quad (4.8)$$

Норму часу для відпочинку та особистих потреб на підприємстві визначають величиною 6% від норми оперативного часу, год:

$$T_{\text{Від}} = 0,06 \cdot ((T_{\text{ЕЛЛ}} + T_{\text{БУФО}}) + T_{\text{д}}) = 0,06 \cdot ((0,301 + 0,188) + 0,098) = 0,035 \text{ год}. \quad (4.9)$$

Норма підготовчо-заключного часу приймається на підприємстві в розмірі 4% від норми основного часу, год.

$$T_{\text{п.з.}} = 0,04 \cdot (T_{\text{ЕЛЛ}} + T_{\text{БУФО}}) = 0,04 \cdot (0,301 + 0,188) = 0,098 \text{ год}. \quad (4.10)$$

Таким чином, штучно-калькуляційний час на обробку однієї втулки становитиме, год.:

$$T_{шт-к} = (0,301 + 0,188) + 0,098 + 0,023 + 0,035 + 0,098 = 0,743 \text{ год.}$$

Визначаємо розмір заробітної плати робітників, задіяних на додаткових операціях технологічного процесу за формулою (4.2)

$$C_{зп} = 0,743 \cdot 180(1 + 0,22) = 163,16 \text{ грн.}$$

Визначення вартості витратних матеріалів для виконання електроіскрового легування виконуємо на підставі норм витрат на підприємстві.

$$C_{BM} = H_{BM} \cdot \Pi_{BM} = 0,05 \cdot 1670 = 83,50,$$

де $H_{BM} = 0,05$ кг – норма витрати матеріалу електродного матеріалу на обробку однієї деталі;

$H_{BM} = 1670$ грн – вартість 1 кг електродного матеріалу, в розглянутому випадку – твердий сплав Т15К6.

Розрахунок вартості технологічної енергії

Проведемо розрахунок обсягу електроенергії, необхідний для електроіскрової обробки захисної втулки за формулою, кВт·год:

$$A_{e.a.} = \frac{I \cdot U \cdot T_{EII}}{1000 \cdot \eta} = \frac{1,6 \cdot 87 \cdot 0,301}{1000 \cdot 0,6} = 0,070 \quad (4.11)$$

де $U=87$ В – величина напруги на аноді в процесі обробки;

$I=1,6$ А – величина сили струму в процесі обробки;

$\eta=0,60$ – ККД установки у відповідності з її технічними характеристиками;

$T_o=3,01$ год– основний час на операціях легування.

Вартість технологічної електроенергії визначаємо за формулою, грн.:

$$C_{т.ен.} = A_{e.a.} \cdot \Pi_e = 0,070 \cdot 3,7 = 0,26 \text{ грн,} \quad (4.12)$$

де $\Pi_e = 3,7$ грн – ціна 1 кВт/год електроенергії для промислових споживачів.

Технологічна собівартість додаткової обробки

Для визначення технологічної собівартості виконання додаткових операцій обробки однієї ЗВ використовуємо формулу (4.7), яка прийме вигляд:

$$C_{\text{дод}} = C_{\text{ЗП}} + C_{\text{е.м.}} + C_{\text{т.ен.}} = 163,16 + 83,50 + 0,26 = 246,92 \text{ грн} \quad (4.13)$$

де $C_{\text{ЗП}}$ – загальні витрати з фонду заробітної плати, грн;

$C_{\text{е.м.}}$ – вартість матеріалів для ЕІЛ, грн;

$C_{\text{т.ен.}}$ – витрати на технологічну електроенергію, грн.

Економічна ефективність запропонованої технології

Розмір економічного ефекту від запровадження запропонованої технології підвищення зносостійкості робочої поверхні захисної втулки визначається зменшенням величини питомих витрат на експлуатацію виробу за рахунок збільшення надійності виробу та міжремонтних інтервалів. Це виражається в зменшенні величини амортизаційних відрахувань в порівнянні з базовим виробом. Використовуємо формулу:

$$E = \frac{C_{\text{баз}}}{T_{\text{баз}}} - \frac{C_{\text{баз}} + C_{\text{дод}}}{T_{\text{нов}}} = \frac{2480}{4} - \frac{2480 + 246,92}{4,8} = 51,89 \text{ грн}, \quad (4.14)$$

де $C_{\text{баз}} = 2480$ грн – вартість базової захисної втулки за даними виробника;

$T_{\text{баз}} = 4$ років – термін служби базової захисної втулки за даними виробника;

$T_{\text{нов}} = 4,8$ років – термін служби захисної втулки, виготовленої за вдосконаленою технологією за даними виробника збільшиться щонайменше на 20%;

Таким чином, економічний ефект від застосування захисних втулок, що виготовлені за запропонованим технологічним процесом становить 51,89 грн на одну втулку.

Реалізація нового варіанту технологічного процесу потребує придбання нового технологічного обладнання, а саме (вартість вказана орієнтовна):

- механізована установка для ЕІЛ «Елітрон – 52А» (або аналог), вартість 37 тис. грн;
- установка БУФО, вартість 8 тис. грн;

Загальні капіталовкладення підприємства на придбання нового обладнання складуть $K = 45$ тис. грн. Визначимо кількість деталей, які необхідно реалізувати для окупності капіталовкладень за формулою:

$$O = \frac{K}{E} = \frac{45000}{51,89} = 867,22 \text{ шт.} \quad (4.21)$$

Враховуючи, що ТОВ «ТРІЗ ЛТД» за 2023 рік виготовило та передало на остаточне збирання 200 шт. захисних втулок різних розмірів, то капіталовкладення окупляться за $867,22/200=4,33$ роки, що підтверджує ефективність розробленої технології та дозволяє рекомендувати її до впровадження в виробництво.

4.5. Технологічні рекомендації застосування технології виготовлення і ремонту деталей машин, працюючих в умовах гідроабразивного зносу

При виготовленні і ремонті деталей машин, працюючих в звичайних умовах гідроабразивного зносу зі сталі 45 (табл. 4.13), рекомендується, з метою підвищення зносостійкості їх поверхневих шарів, застосовувати екологічно безпечну технологію, що включає: шліфування поверхонь, які підлягають обробленню; цементацію методом ЕІЛ; алітування алюмінієвим ЕІ цементованої поверхні; наступне легування ЕІ, виготовленим методом ПМ, з композиційного зносостійкого матеріалу 90%ВК6+10%ІМ на установці моделі «Елітрон-52А»; нанесення МПМ, армованого порошком 80%ZrN; шліфовку.

Для деталей машин зі сталі 45, працюючих не тільки в умовах гідроабразивного зносу, а і умовах радіаційного опромінення, коли в поверхневому шарі неможлива присутність кобальту, після ЦЕІЛ і алітування, потрібно провести ЕІЛ компактным ЕІ з ніхромового дроту Ø 3мм (матеріал Х20Н80) з використанням СТНС складу: 5%Si+5%B+90% вазелін і провести на сформованому шарі БУФО.

Технологія нанесення захисного покриття при виготовленні і ремонті деталей машин, працюючих в умовах гідроабразивного зносу зі сталі 12Х18Н10Т не відрізняється від технології нанесення на сталь 45 (див. табл. 4.13).

При нанесенні захисних покриттів на деталі з високоміцних чавунів непотрібно проводити ЦЕІЛ, а розпочинати нанесення покриття з алітування поверхневого шару з подальшим ЕІЛ компактным ЕІ з композиційного

зносостійкого матеріалу 90%ВК6+10%1М, нанесенням МПМ, армованого порошком 80%ZrN і шліфовкою.

Зміцнення металорізального інструменту з швидкорізальної сталі Р6М5 проводять шляхом ЕІЛ ріжучих кромek ЕІ з твердого сплаву ВК6 з використанням СТНС складу: 0,5%Si + 0,5%B + 2%Cr + 7% Ni+90% вазелін.

Таблиця 4.13 – Технологічні рекомендації нанесення захисних покриттів на деталі, працюючі в умовах гідроабразивного зносу

Матеріал деталі	Найменування деталі	Вид зміцнення	Твердість поверхні, МПа	Шорсткість Ra, мкм
1	2	3	4	5
Сталь 45	Ротори гвинтових і відцентрових насосів і компресорів; центрифуг тощо загального призначення	ЦЕІЛ → ЕІЛАІ → ЕІЛ компактним ЕІ, виготовленим методом ПМ складу (90%ВК6+ 10%1М) → МПМ, армований порошком 80%ZrN; шліфовка.	12800	0,5-0,8
	Ротори гвинтових і відцентрових насосів і компресорів; центрифуг тощо працюючі в умовах радіаційного опромінювання	ЦЕІЛ → ЕІЛАІ → ЕІЛ компактним ЕІ ніхромовим дротом Ø3мм; (матеріал Х20Н80) з СТНС складу: 5%Si+5%B+90% вазелін; БУФО.	11500	0,5-0,8

1	2	3	4	5
12X18H10 Т	Захисні втулки, робочі колеса, лопаті шнеків тощо	ЦЕІЛ → ЕІЛАІ → ЕІЛ компактним ЕІ, виготовленим методом ПМ складу (90%ВК6+ 10%1М) → МПМ (80% ZrN); шліфівка.		0,5-0,8
Високоміц ні чавуни: ВЧ50, ВЧ60, ВЧ70, ВЧ80, ВЧ90, ВЧ 100.	поршневі кільця, гільзи, шестерні, деталі двигунів, насосів, виливниці, прокатні валки	ЕІЛАІ → ЕІЛ компактним ЕІ, виготовленим методом ПМ складу (90%ВК6+ 10%1М) → МПМ (80% ZrN); шліфівка.	12500	0,5-0,8
Швидкоріз альна сталь Р6М5	Металорізальний інструмент: кінцеві фрези, дискові фрези, свердла, різці, протяжки, тощо.	ЕІЛ стандартними пластинами, розміром 2х3х30 мм з твердого сплаву ВК6; склад СТС: 0,5%Si + 0,5%B + 2%Cr + 7% Ni+90% вазелін	14600	0,5-0,8

В результаті проведених досліджень з'явилась можливість рекомендувати нову екологічно безпечну технологію виготовлення і відновлення деталей машин, працюючі в умовах гідроабразивного зносу, до впровадження в виробництво. В табл. 4.14 представлені результати промислової апробації результатів досягнутих в дисертаційній роботі.

Таблиця 4.14 – Промислова апробація результатів досягнутих в дисертаційній роботі

№ зп	Назва підприємства	Очікуваний економічний ефект, грн
1	ПАТ «НВАТ ВНДІКОМПРЕСОМАШ»	137
2	ТОВ «ТРІЗ ЛТД»	193
3	АТ «СМНВО ІНЖИНІРИНГ»	75

Загальний очікуваний економічний ефект становить 405 тис. грн.

4.6. Висновки:

1. В результаті порівняльних випробувань встановлено, що кращою стійкістю проти гідроабразивного зносу володіють зразки сталі 45 з покриттям нанесеним методом ЕІЛ електродом з твердого сплаву ВК6 з використанням СТНС складу 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін, знос яких після 24 годин випробування складає 221 мг, що на 122 % менше ніж у зразків без покриття і на 15 і 31 % зразків з покриттями, нанесеними електродами з ніхромового дроту Х20Н80 з використанням СТНС складу 0,5%Si+0,5%B+59%BK6+40% вазелін і СТС складу 5%Si+5%B+90% вазелін, та на 22 і 47 % менше чим з покриттями, нанесеними електродами, виготовленими методом ПМ, складу 90% ВК6 + 10% 1М і 1М.
2. Кращою стійкістю проти гідроабразивного зносу володіють зразки зі сталі Р6М5 з покриттям, нанесеним методом ЕІЛ електродом з твердого сплаву ВК6 з використанням СТНС складу 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7%Ni+90% вазелін, знос яких після 24 годин випробувань складає 188 мг, що на 43 % менше, ніж у зразків без покриття, і на 6 і 15 % зразків з покриттям, нанесеним методом ЕІЛ електродом з ніхромового дроту складу Х20Н80 з використанням СТС складу 0,5%Si+0,5%B+59%BK6+40% вазелін і СТНС складу 5%Si+5%B+90% вазелін, та на 24 і 27 % менше, ніж з покриттями, нанесеними електродами виготовленим методом ПМ, складу 90% ВК6 + 10% 1М і 1М.

3. Аналіз ефективності процесу зношування показав, що зі збільшенням часу знос, за рівні проміжки часу, поступово збільшується. Так, для зразків з і без покриття, і зразків з найменшим зносом з покриттям, нанесеним методом ЕІЛ за новою технологією, електродом з твердого сплаву ВК6 з використанням СТНС складу $0,5\%Si+0,5\%B+2\%Cr+7\%Ni+90\%$ вазелін, знос по мірі збільшення часу за кожні 6 годин постійно збільшується і складає, для сталі 45, відповідно, 103; 215; 344; 491 і 51; 104; 160; 221 мг, а для сталі Р6М5, відповідно, 61; 124; 192; 268 і 41; 84; 132; 188 мг.
4. При ЕІЛ ЕІ, виготовленими методом ПМ, деталей зі сталі 45 і сталі Р6М5 супроводжується зниженням межі міцності (σ_b) і межі плинності (σ_T), відповідно, на 11,8 і 7,7 % та 11,5 і 7,1 %, а відносне подовження (δ) і відносне звуження (ψ) зростає, відповідно, на 12,5 і 2,5 % та 8,0 і 6,9%. Шорсткість поверхневого шару зростає з $Ra = 0,5$ до $Ra=5,3-6,5$ мкм, а суцільність покриття складає 70-80 %.
5. При нанесенні покриттів, сформованих в два етапи, шорсткість поверхні збільшується з $Ra = 0,5$ до $Ra=1,9-2,0$ мкм, а суцільність покриття збільшується до 90 % і, як результат, σ_b і σ_T зменшується, для сталі 45 і сталі Р6М5, відповідно на 5,1 і 4,0 та 2,7 і 2,4 %, а δ і ψ зростає, відповідно ~ на 9,4 і 1,3 % та 5,8 і 5,0 %.
6. При нанесенні покриттів, сформованих в два етапи і проведення БУФО шорсткість поверхні становиться ще меншою $Ra=1,9-2,0$ мкм, суцільність покриття збільшується до 95 %. В результаті σ_b і σ_T збільшуються, для сталі 45 і сталі Р6М5, відповідно на 2,8 і 3,1 та 2,0 і 1,8 %, а δ і ψ зменшуються, відповідно на 1,3 і 0,9 % та 0,8 і 0,7 %.
7. При нанесенні покриттів, сформованих за новою технологією, з використанням ЕІ з дроту Х20Н80 і твердого сплаву ВК6 та СТНС, як за один етап, так і в два етапи, зниження σ_b і σ_T значно менше, і складає, відповідно 8,2 і 4,9 та 2,7 і 2,4% і 8,8 і 4,4 та 4,5 і 1,8 %, а δ і ψ зростає також менше, відповідно на 11,9 і 1,7 та 9,4 і 1,0 % й 8,0 і 6,9 та 5,6 і 4,8 %. При подальшій БУФО зростання σ_b і σ_T збільшуються, для сталі 45 і сталі Р6М5, відповідно на 4,9 і 4,6 та 3,5 і 2,7 %, а δ і ψ зменшуються, відповідно на 1,7 і 1,3 та 2,0 і

- 1,7 %. Шорсткість поверхні зменшується до $Ra = 1,1$ мкм, а суцільність складає 100 %.
8. До практичної реалізації пропонуються зносостійкі покриття, сформовані за новою технологією, з використанням ЕІ з дроту Х20Н80 і твердого сплаву ВК6 та СТНС в два етапи з наступною БУФО, зростання σ_v і σ_t яких збільшуються, для сталі 45 і сталі Р6М5, відповідно на 4,9 і 4,6 та 3,5 і 2,7 %, а δ і ψ зменшуються, відповідно на 1,7 і 1,3 та 2,0 і 1,7 %. Шорсткість поверхні при цьому складає $Ra = 1,1$ мкм, а суцільність - 100 %.
 9. Електроіскрове легування ЕІ складу (90% ВК6 + 10% 1М) і 1М, виготовленими методом ПМ, зразків з високоміцного чавуну при $W_p = 0,55$ Дж і $Q = 0,67$ см²/хв супроводжується зниженням σ_t і σ_v , відповідно на 32,0 і 32,78 % і 34,0 і 28,7 %, а δ , при цьому, зростає на 5,71 і 5,43%. Шорсткість поверхневого шару збільшується з $Ra = 0,5$ до 3,2 і 3,3 мкм, а суцільність покриття (S) складає, відповідно 60 і 80 %. Після обробки БУФО σ_t і σ_v збільшуються, відповідно до 325 і 324,1 та 512 і 526 МПа, а δ , зменшується, відповідно до 1,16 і 2,14 %. Шорсткість поверхні зменшується до $Ra = 0,8$ і 0,7 мкм, а суцільність збільшується і складає 70 і 90 %.
 10. При ЕІЛ зразків з високоміцного чавуну ВЧ50 ЕІ з дроту Х20Н80 і твердого сплаву ВК6 та з використанням СТНС, зниження σ_t і σ_v менше, і складає, відповідно 26,3 і 21,87 та 33,16 і 33,58%, а δ також зменшується і складає, відповідно 2,86 і 3,57 %. При подальшій БУФО зростання σ_t і σ_v збільшуються, відповідно до 341,1 і 335,4 та 538,2 і 532,1 МПа, а δ зменшується, відповідно на 4,0 і 3,0 %. Шорсткість покриття зменшується до $Ra = 0,8$ і 0,7 мкм, а суцільність складає, відповідно 100 і 95 %.
 11. При збільшенні W_p до 1,3 і 3,4 Дж і використанні компактних ЕІ складу (90%ВК6+10%1М) і 1М, виготовлених методом ПМ та ЕІ з твердого сплаву ВК6 і ніхромового дроту Х20Н80 з використанням СТНС σ_t зменшується при $W_p=1,3$ Дж до: 211,3; 225,7 МПа, а при $W_p = 3,4$ Дж до 205,3 і 211,4 МПа, σ_v при $W_p = 1,3$ Дж до 375,3 і 349,2, а при $W_p = 3,4$ Дж до 321,2 і 325,2 МПа, δ , при цьому, збільшується, відповідно до: 7,15 і 7,17 та 7,20 і 7,18 %. Шорсткість поверхневого шару покриття збільшується при $W_p=1,3$ Дж до $Ra=3,7$; 3,9; 4,2

- і 4,3 мкм, а при $W_p=3,4$ Дж до $R_a = 6,0; 6,3; 6,7$ і $7,5$ мкм. Суцільність зменшується і складає при $W_p=1,3$ Дж до $S = 55; 70; 85$ і 80% , а при $W_p = 3,4$ Дж, до $S = 45; 50; 70$ і 65% .
12. Після наступної БУФО σ_t збільшується при $W_p=1,3$ Дж до: $321; 321,5; 325,1$ і $324,4$ МПа, а при $W_p=3,4$ Дж до $320,5; 320,9; 323,1$ і $322,8$, σ_v збільшується при $W_p=1,3$ Дж до 506 і 507 , а при $W_p=3,4$ Дж до $502,1; 503,6; 505,8$ і $504,9$ МПа δ , при цьому, зменшується, відповідно до: $6,89$ і $6,81$ та $6,75$ і $6,59 \%$. Шорсткість покриття зменшується при $W_p=1,3$ Дж до $R_a = 0,8; 0,8; 0,9$ і $0,9$ мкм, а при $W_p=3,4$ Дж до до $R_a = 1,2; 1,3; 1,4$ і $1,5$ мкм, а суцільність збільшується, відповідно до $60, 75, 85$ і 80 та $55, 65, 80$ і 75% .
13. Запропонована нова технологія, яка забезпечує підвищення здатності деталей чинити опір зношуванню, гарантує надійність і довговічність їх роботи в агресивних середовищах, екологічну безпеку і скорочення витрат на їх виготовлення. Кращою стійкістю володіють зразки з сталі 12X18H10T, з покриттями сформованим в послідовності: $ЦЕІЛ \rightarrow ЕІЛА1 \rightarrow ЕІЛ (90\%ВК6+10\%1М) \rightarrow МПМ (80\% ZrN)$, знос яких у порівнянні із зразками зі сталі 45 менший на $37,3\%$, на $96,7\%$ менше зразків без покриття, на $38,7\%$ менше в порівнянні з аналогом і, відповідно, на $6,5$ і на $9,7\%$, менше покриттів, МПМ яких, армовані сумішшю ($40\%WC+40\%ZrN$) і $80\% WC$).
14. Для високоміцного чавуну марки ВЧ60 найкращі результати з гідроабразивної зносостійкості показали зразки з покриттям, сформованим в послідовності: $ЕІЛ А1 \rightarrow ЕІЛ (90\%ВК6+10\%1М) \rightarrow МПМ (80\% ZrN)$, знос яких на $97,1\%$ менше зразків без покриття, на $44,1\%$ менше в порівнянні з прототипом (зразками зі сталі 12X18H10T) і відповідно, на $5,9$ і $14,7\%$ менше сформованих в послідовності $ЕІЛА1 \rightarrow ЕІЛ (90\%ВК6+10\%1М) \rightarrow МПМ (40\%WC+40\%ZrN)$ і в послідовності $ЕІЛА1 \rightarrow ЕІЛ (90\%ВК6+10\%1М) \rightarrow МПМ (80\% WC)$.
15. По матеріалам досліджень опубліковані наступні роботи [142, 143, 150, 151].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. В результаті аналізу роботи машин і пристроїв газо-нафтової, гірничодобувної, металургійної, хімічної, сільськогосподарській, транспортної та інших галузях промисловості, встановлено, що більшість із них працює в важких умовах оточуючих середовищ і підлягають інтенсивному зношенню, внаслідок контакту з абразивом, що знаходиться в потоках рідини і крім гідроабразивного підлягають також іншим видам зношування: корозії, ерозії, кавітації, біологічному пошкодженню тощо.

2. На сьогодні для захисту поверхонь деталей, що працюють в важких умовах оточуючих середовищ і підлягають інтенсивному гідроабразивному зношенню, крім зміцнення поверхневих шарів, серед яких особливе місце займає хіміко-термічне оброблення, використовують інші методи: приварювання зносостійких пластин, напилювання і наплавлення твердими зносостійкими матеріалами, нанесення шлікерних покриттів, які є шкідливими для здоров'я людини і небезпечними для оточуючого середовища. Серед найбільш ефективних, енергоощадних і екологічно безпечних технологій нанесення захисних покриттів, особливе місце займає електроіскрове легування, яке в комбінації з поверхневим пластичним деформування і нанесенням металопластичних матеріалів, армованих порошками твердих зносостійких матеріалів (карбід вольфраму і нітрид цирконію) може забезпечити захист деталей від гідроабразивного і інших видів зносу.

3. Проведеними дослідженнями доведено, що альтернативною технології захисту сталейних і чавунних деталей машин від гідроабразивного і інших видів зношування, шляхом нанесення методом ЕІЛ захисних покриттів ЕІ складу 90%ВК6+10%1М, виготовленими методом порошкової металургії може бути більш технологічна, дешевша і ефективніша технологія, що полягає в використанні компактних ЕІ з застосуванням СТНС.

4. На підставі теоретичних досліджень розроблено систему спрямованого вибору екологічно безпечної технології виготовлення і ремонту відповідальних деталей машин, які працюють у важких умовах гідроабразивного зносу. При

цьому розроблена формалізована методика визначення оптимального варіанта потрібної технології, а кожен її варіант реалізується можливими комбінаціями рішень мінімізованими з економічних і екологічних показників.

5. В результаті проведених досліджень запропонована нова технологія, яка забезпечує підвищення здатності деталей чинити опір зношуванню, гарантує надійність і довговічність їх роботи в агресивних середовищах, екологічну безпеку і скорочення витрат на їх виготовлення. Кращою стійкістю володіють зразки з сталі 12X18H10T, з покриттями: ЦЕІЛ $\rightarrow$ ЕІЛ А1 $\rightarrow$ ЕІЛ (90%ВК6+10%1М) $\rightarrow$ МПМ (80% ZrN), знос яких у порівнянні із зразками зі сталі 45 менший на 37,3%, на 96,7% менше зразків без покриття, на 38,7% менше в порівнянні з аналогом і, відповідно, на 6,5 і на 9,7%, менше покриттів, МПМ яких, армовані сумішшю (40%WC+40%ZrN) і 80%WC). Для високоміцного чавуну марки ВЧ60 кращі результати з гідроабразивної зносостійкості показали зразки з покриттям, сформованим в послідовності: ЕІЛ А1 $\rightarrow$ ЕІЛ (90%ВК6+10%1М) $\rightarrow$ МПМ (80% ZrN), знос яких на 97,1% менше зразків без покриття, на 44,1% менше в порівнянні з прототипом (зразками зі сталі 12X18H10T) і відповідно, на 5,9 і 14,7% менше сформованих в послідовності ЕІЛА1 $\rightarrow$ ЕІЛ (90%ВК6+10%1М) $\rightarrow$ МПМ (40%WC+40%ZrN) і в послідовності ЕІЛА1 $\rightarrow$ ЕІЛ (90%ВК6+10%1М) $\rightarrow$ МПМ (80% WC).

6. Розроблені і впроваджені у виробництво технологічні рекомендації виготовлення й ремонту деталей машин, поверхні яких в процесі роботи підлягають гідроабразивному і другим видам зношування, економічними, енергоощадними і екологічно безпечними технологіями, захищеними двома патентами України із загальним економічним ефектом 405 тис. грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бучинський М. Я., Горик О. В., Чернявський А. М., Яхін С. В. Основи творення машин / [за ред. О. В. Горика (д. т. н., проф., засл. прац. нар. освіти України)]. — Харків : Вид-во «НТМТ», 2017. — 448 с.
2. Насоси. Класифікація. Терміни та визначення : ДСТУ 3063-95 – [Чинний від 1996-07-01] – К.: Держстандарт України. – 1995. – 76 с. – (Національний стандарт України).
3. Кулінченко В. Р. Гідравліка, гідравлічні машини і гідропривід. – К. : ЦНЛ, – 2006. – 616 с.
4. Different Types of Pumps. URL: <https://www.haoshpump.com/different-types-of-pumps/> (дата звернення: 10.12.2023)
5. Класифікація гідравлічних двигунів і їх призначення. URL: <https://hydromarket.com.ua/ua/a398858-klassifikatsiya-gidravlicheskih-dvigatelj.html> (дата звернення: 10.12.2023)
6. Саржанов О. А. Аналіз методів ремонту відповідальних деталей центрифуг для стічних вод / О. А. Саржанов, Б. О. Саржанов // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія : Механізація та автоматизація виробничих процесів. - 2016. - Вип. 10(3). - С. 58-62. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vsna_mekh_2016_10\(3\)_14](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vsna_mekh_2016_10(3)_14).
7. Про затвердження Правил приймання стічних вод до систем централізованого водовідведення та Порядку визначення розміру плати, що справляється за понаднормативні скиди стічних вод до систем централізованого водовідведення : затверджено наказом Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України №316 від 01.12.2017р. URL: http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/RE31508.html (дата звернення: 10.12.2023)
8. Центрифугальне обладнання виробництва АТ «СМНВО - Інжиніринг». Технічний каталог. URL: <https://frunze.com.ua/wp-content/uploads/2023/06/Tsentryfuhy-ua-2023-06.pdf> (дата звернення: 10.12.2023)

9. Литвиненко О.А., Некоз О.І., Кавун В.П. Кавітаційна стійкість керамічних конструкційних матеріалів / Збірник наукових праць ВАТ «УкрНДІВогнетривів імені А. С. Бережного» № 110. – Харків: «Каравела» .- 2010.- С.115-118.

10. Демчук М.В., Решетник А.О., Лайтер-Москалюк С.В. Проблеми утилізації гною в сучасному тваринництві. // Науковий вісник ЛНУВМБТ імені С.З. Гжицького. – 2010. – Т. 12. – № 3(45). Част. 4. – С. 188-195.

11. [Саржанов О. А.](#) Аналіз методів ремонту відповідальних деталей центрифуг для стічних вод / О. А. Саржанов, Б. О. Саржанов // [Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія : Механізація та автоматизація виробничих процесів.](#) - 2016. - Вип. 10(3). - С. 58-62. - URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vsna_mekh_2016_10%283%29_14

12. Тарельник В.Б., Саржанов Б.О. Нові технології виготовлення та ремонту шнеку технічних засобів видалення, переробки та екологічно безпечної утилізації гною на тваринницьких комплексах // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – №21. – 2020. – С. 128-136.

13. Саржанов Б.О. Розробка екологічно безпечних методів відновлення шнеків машин технологічного циклу утилізації гною. – Дисертація ... доктора філософії : 133 – Галузеве машинобудування. – Сумський національний аграрний університет, Суми, 2021. 222 с.

14. Венцель Є.С., Лисіков Є.М., Євтушенко А.В. Основи трибології та хімотології: Навч. посібник. – Харків: УкрДАЗТ, 2007. – 241 с.

15. Калганков Є.В. Деякі проблеми гідроабразивно-втомного зносу деталей об'ємного гідроприводу мобільних машин // Геотехнічна механіка. – 2013. Вип. 108. – С. 133-143.

16. Шимчук, С.П. Метод дослідження протизносних властивостей мастильних матеріалів при радіальних коливаннях валу : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.04. Київ, 2008. 16 с.

17. Закалов О.В. Закалов І.О. Основи тертя і зношування в машинах: Навчальний посібник. Тернопіль: Видувництво ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 322 с.

18. Мозговий О., Посвятенко Е., Посвятенко Н., Русских В.. Одна із причин пошкодження шестеренних гідромашин // Актуальні проблеми математики, фізики і технологій: зб. наук. пр. / Вінниця: ТОВ «Твори», 2019.– Вип. 16. – С. 135-138.

19. Посвятенко Е.К., Кропівний В.М., Посвятенко Н.І., Русских В.В. Ремонт шестеренних насосів гідросистем дорожніх машин // Bulletin of Kharkov national automobile and highway university. Collection of Scientific Works. – Kh.: KhNAHU, 2017. – Issue 38. – P. 113 – 117.

20. Грабар І.Г., Зембицький В.В., Сичевський В.М., Швагро М.В., Курис І.М. Зношувальна здатність мінеральних добрив. // Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали II Міжнар.наук.-практ. Інтернет-конференції (Мелітополь, 02-27 листопада 2020 р.). Мелітополь: ТДАТУ, 2020. С. 49-50.

21. Mamazhonov M., Shakirov B., Matyakubov B., Makhmudov A. (2022). Polymer materials used to reduce waterjet wear of pump parts. *J. Phys.: Conf. Ser.* **2176** 012048. DOI: 10.1088/1742-6596/2176/1/012048

22. Glovatsky O. Ya. Improving the operation of pumping stations // Agriculture of Uzbekistan. 1992. – №10, pp. 27 – 29

23. Glovatsky O. Ya., Isakov Kh. Kh., Pak O. Yu., Talipov Sh. G. (2004). Some environmental aspects of energy-saving modes of reclamation pumping stations. *Journal Modern problems of water resources management* vol.2. pp. 19 – 24

24. Kim V. A., Kabulov I. N. (1991). Experience in operating centrifugal pumps. *Melioration and water management* vol.5. pp. 37-39.

25. Matyakubov B., Mamazhonov M., Shakirov B.M., Teplova G., Shakirov B.B. (2020). Forebays of the polygonal cross - section of the irrigating pumping station. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* **883**(1) 012050

26. Ulugojayev K. Kh. (1989). Removal of axial pumps (Tashkent: Mehnat)

27. Leonidov L. D. J. (1987). Erosion of pump metals. *Flower metals*. **6** 26-28

28. Niță, A.; Petrescu, M.G.; Dumitru, T.; Burlacu, A.; Tănase, M.; Laudacescu, E.; Ramadan, I. Experimental Research on the Wear Behavior of Materials Used in the

Manufacture of Components for Cement Concrete Mixers. *Materials* 2023, 16, 2326. <https://doi.org/10.3390/ma16062326>

29. Stel'makh, S.A.; Shcherban, E.M.; Shuiskii, A.I.; Prokopov, A.Y.; Madatyan, S.M.; Parinov, I.A.; Cherpakov, A.V. Effects of the Geometric Parameters of Mixer on the Mixing Process of Foam Concrete Mixture and Its Energy Efficiency. // *Appl. Sci.* 2020, vol. 10, 8055.

30. Valigi, M.C.; Logozzo, S.; Landi, L.; Braccesi, C.; Galletti, L. Twin-Shaft Mixers' Mechanical Behavior Numerical Simulations of the Mix and Phases. // *Machines*. 2019, vol. 7, 39.

31. Labiapari, W.S.; Gonçalves, R.J.; de Alcantara, C.M.; Pagani, V.; Di Cunto, J.C.; de Mello, J.D.B. Understanding Abrasion-Corrosion to Improve Concrete Mixer Drum Performance: A Laboratory and Field Approach. // *Wear*. 2021, vol. 477, 203830.

32. Fasano, J.; Janz, E.; Myers, K. Design Mixers to Minimize Effects of Erosion and Corrosion Erosion. // *Int. J. Chem. Eng.* 2012, 2012, 171838.

33. Sapate S.G.; RamaRao A.V. Effect of Erodent Particle Hardness on Velocity Exponent in Erosion of Steels and Cast Irons. // *Mater.Manuf. Process*, 2003, **18**, 783–802.

34. Braccesi C., Landi L. An Analytical Model for Force Estimation on Arms of Concrete Mixers. // *Proceedings of the ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Volume 1: 22nd Biennial Conference on Mechanical Vibration and Noise, Parts A and B. San Diego, California, USA. August 30–September 2, 2009. pp. 195-204. ASME. <https://doi.org/10.1115/DETC2009-86621>

35. Zhang, H., Feng, P. & Ying, W. Abrasive wear and optimal installation angle of concrete double-horizontal shaft mixer stirring blades. // *SN Appl. Sci.* **2**, 1067 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2775-3>

36. Yao Z., Yang R, Yuan W., An H. Mechanical Analysis and Optimal Design of Mixing Paddles for CSAM Mixers. // *Acad. J. Manuf.Eng.* 2019,**17**, 80–86.

37. Khidir T.C. Designing, Remodeling and Analyzing the Blades of Portable Concrete Mixture. // *Int. J. Mech. Eng. Robot. Res.* 2018, **7**, 674-768. doi: 10.18178/ijmerr.7.6.674-678

38. Jungedal M. 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, 2012. – 68 p.

39. <https://www.waterworld.com/home/article/16200918/preventing-pump-deterioration>

40. Надійність гідромашин і гідроприводів : конспект лекцій / укладач В. Ф. Герман. – Суми : Сумський державний університет, 2014. – 84 с.

41. Корозія металу – це проблема, яку краще попереджувати, ніж лікувати. URL: <https://gmt.net.ua/novini/koroziya-metalu-ce-problema-yaku-krashhe/> (дата звернення: 10.12.2023)

42. Втомне, корозійне, кавітаційне, ерозійне, водневе та зношування при фретінг-корозії : конспект лекцій з дисципліни «Триботехніка» – Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного. URL: <http://www.tsatu.edu.ua/tstt/wp-content/uploads/sites/6/lekcija-8-vtomne-korozijne-kavitacijne-erozijne-vodneve-ta-znoshuvannja-pry-fretinh-koroziyi-z-dyscypliny-trybotehnika-133-hm.pdf> (дата звернення: 10.12.2023)

43. Дейнега Р.О., Чумаченко Я.В., Фафлей О.Я., Мельник В.О., Михайлюк В.В., Ященко Д.О. Особливості дослідження зношування елементів фонтанних арматур методом імітаційного моделювання // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2020. № 1(74). – С. 45-52.

44. Полутренко М.С. Мікробіологічна корозія підземних металоконструкцій та способи їх захисту. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2012. №4(45). С. 184-188.

45. Андреюк К.І. Мікробна корозія підземних споруд / К.І. Андреюк, І.П. Козлова, Ж.П. Коптева [та ін.]. – К.: Наукова думка, 2005. – 258 с

46. Галушка А. Бактерії циклу сірки та їхня роль у природі // Вісник Львів. Ун-ту. Серія біологічна. – 2007. – №43. – С. 61-77.

47. Kuric, I., Kandra, M., Klarák, J., Ivanov, V., Więcek, D. (2020). Visual Product Inspection Based on Deep Learning Methods. In: Tonkonogyi, V., *et al.* Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in

Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_15.

48. Zahorulko A., Kundera C., Hudkov S. Determination of mechanical characteristics of stuffing box packings // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. **233**: 012039 (2017). DOI: 10.1088/1757-899X/233/1/012039

49. Zahorulko A. Experimental investigation of mechanical properties of stuffing box packings // *Sealing Technology*, 2015, Iss. **8**: 7 (2015). [https://doi.org/10.1016/S1350-4789\(15\)30244-0](https://doi.org/10.1016/S1350-4789(15)30244-0)

50. Kotliar A., Basova Y., Ivanov V., Murzabulatova O., Vasytsova S., Litvynenko M., Zinchenko O. Ensuring the economic efficiency of enterprises by multi-criteria selection of the optimal manufacturing process // *Management and Production Engineering Review*, 11, No. 1: 52-61 (2020). DOI: 10.24425/mper.2020.132943

51. Ivanov V., Dehtiarov I., Denysenko Y., Malovana N., Martynova N. (2018). Experimental diagnostic research of fixture // *Diagnostyka*, 19(3), pp.3-9. <https://doi.org/10.29354/diag/92293>

52. Ivanov, V., Dehtiarov, I., Pavlenko, I., Kosov, M., Hatala, M. (2020). Technological Assurance and Features of Fork-Type Parts Machining. In: *Ivanov, V., et al. 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_12

53. Ivanov, V., Pavlenko, I., Kuric, I., Kosov, M. (2019). Mathematical Modeling and Numerical Simulation of Fixtures for Fork-Type Parts Manufacturing. In: *Knapčíková, L., Balog, M. (eds) Industry 4.0: Trends in Management of Intelligent Manufacturing Systems*. EAI/Springer Innovations in Communication and Computing. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14011-3_12

54. Pylypaka S., Zaharova T., Zalevska O., Kozlov D., Podliniaieva O. Determination of the Effort for Flexible Strip Pushing on the Surface of a Horizontal Cylinder. In: *Tonkonogyi V. et al. (eds) Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering (2020)*. Springer, Cham, pp. 582–590, 2020, DOI: 10.1007/978-3-030-40724-7_59.

55. Pylypaka S., Volina T.M., Mukvich M., Efremova G., Kozlova O. Gravitational Relief with Spiral Gutters, Formed by the Screw Movement of the Sinusoid. In: Ivanov V., Pavlenko I., Liaposhchenko O., Machado J., Edl M. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, pp. 63–73, DOI: 10.1007/978-3-030-50491-5_7.

56. Pylypaka S., Nesvidomin V., Volina T., Sirykh L., Ivashyna L. Movement of the Particle on the Internal Surface of the Spherical Segment Rotating About a Vertical Axis. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 2020, 62(3), pp. 79–86, DOI: 10.35633/inmateh-62-08.

57. Pylypaka S., Volina T., Hryshchenko I., Rybenko I., Sydorenko N. (2021) Dynamics of a Particle on a Movable Wavy Surface. In: Tonkonogyi V. et al. (eds) *Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, pp. 196–206, 2021, DOI: 10.1007/978-3-030-68014-5_20.

58. Volina T., Pylypaka S., Rebrii A., Pavlenko O., Kremets Y. (2021) Particle Movement on Concave Coulter of the Centrifugal Distributor with Radially Installed Vertical Blades. In: Tonkonogyi V. et al. (eds) *Advanced Manufacturing Processes II. InterPartner 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, pp. 237–246, 2021, DOI: 10.1007/978-3-030-68014-5_24.

59. Поверхневе руйнування та зміцнення матеріалів / М. І.Пашечко, М. В. Чернець, М. Опеляк, Г. Комста. – Львів: Євросвіт, 2005. – 384 с. 60. A. Panasyuk, O. Umanskyi, M. Storozhenko, and V. Akopyan, Development of TiB₂-Based Cermets with Fe-Mo Binder. *Key Engineering Materials*, 527: 9 (2013). DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.527.9>

61. O. Umanskyi, M. Storozhenko, M. Antonov, O. Terentjev, O. Koval, and D. Goljandin, Effect of Thermal Spraying Method on the Microstructure and Wear Behaviour of FeNiCrBSiC-CrB₂ Coating. *Key Engineering Materials*, 799: 37–42 (2019). DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.799.37>

62. Radek N., Bartkowiak K., Performance properties of electro-spark deposited carbide-ceramic coatings modified by laser beam. *Physics Procedia A*, 5: 417 (2010). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.163>
63. Smelov V. G., Sotov A. V., and Kosirev S. A. (2014) Development of process optimization technology for laser cladding of GTE compressor blades // *ARPEN Eng. Applied Sci.*, **9**, No. 10: 1854.
64. O. Gaponova, C. Kundera, G. Kirik, V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, Ie. Konoplianchenko, M. Dovzhyk, A. Belous, and O. Vasilenko, *Advances in Thin Films, Nanostructured Materials, and Coatings* (Eds. A. D. Pogrebnjak and V. Novosad) (Springer: 2019), p. 249.
65. V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova, N. V. Tarelnyk, V. S. Martsynkovskyy, B. O. Sarzhanov, O. A. Sarzhanov, and B. Antoszewski, *Powder Metall. Met. Ceram.*, **58**: 703 (2020).
66. A. D. Pogrebnjak, A. M. Mahmud, I. T. Karasha, G. V. Kirik, R. Y. Tkachenko, and A. P. Sypylenko, *J. Nano-Electron. Phys.*, **3**, No. 4: 73 (2011).
67. Radzyevskiy V.N., Hartsunov Yu.F., Tkachenko H.H. Plakirovanye stalnykh detalei s pryimeneniyem vysokotemperaturnoi paiky po shirokomu zazoru s napolnytelem // *Avtomatycheskaia svarka*. - 1997. - № 3.- С. 48-50.
68. Shu-Hung Yeh, Liu-Ho Chiu, and Heng Chang, *Engineering*, **3**, No. 9: 942 (2011).
69. S. BenSlima, *Materials Sciences and Applications*, **3**, Iss. 9: 640 (2012).
70. C. M. Suh, J. K. Hwang, K. S. Son, and H. K. Jang, *Mater. Sci. Eng. A*, **392**, No. 1–2: 31 (2005).
71. J. Baranowska and S. E. Franklin, *Wear*, 264, No. 9–10: 899 (2008).
72. Martsinkovsky, V., Yurko, V., Tarelnik, V., Filonenko, Y. Designing thrust sliding bearings of high bearing capacity (2012) *Procedia Engineering*, **39**, pp. 148-156. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.019>
73. Martsinkovsky, V., Yurko, V., Tarelnik, V., Filonenko, Y. Designing radial sliding bearing equipped with hydrostatically suspended pads (2012) *Procedia Engineering*, **39**, pp. 157-167. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.020>

74. Tarelnik, V.B., Gaponova, O.P., Konoplyantschenko, E.V., Yevtushenko, N.S., Gerasimenko, V.A. Analysis of the structural state of the surface layer after electro-erosive alloying. II. Peculiarities of the formation of electroerosive coatings on special steels and stops by hard wear-resistant and soft antifriction materials (2018) *Metallofizika I Noveishie Tekhnologii*, **40** (6), pp. 795-815. <https://doi.org/10.15407/mfint.40.06.0795>

75. Tarelnyk, V.B., Paustovskii, A.V., Tkachenko, Y.G., Konoplianchenko, E.V., Martsynkovskyy, V.S., Antoszewski, B. Electrode Materials for Composite and Multilayer Electrospark-Deposited Coatings from Ni–Cr and WC–Co Alloys and Metals (2017) *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **55** (9-10), pp. 585-595. <https://doi.org/10.1007/s11106-017-9843-2>

76. Tarelnik, V.B., Paustovskii, A.V., Tkachenko, Y.G., Martsynkovskii, V.S., Konoplyanchenko, E.V., Antoshevskii, K. Electric-spark coatings on a steel base and contact surface for optimizing the working characteristics of babbitt friction bearings (2017) *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, (3), pp. 285-294. <https://doi.org/10.3103/S1068375517030140>

77. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, V. B. Loboda, E. V. Konoplyanchenko, V. S. Martsynkovskii, Yu. I. Semirnenko, N. V. Tarelnyk, M. A. Mikulina, and B. A. Sarzhanov, *Surf. Eng. Applied Electrochemistry*, 57: 173 (2021).

78. 3. O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk, V. S. Martsynkovskyy, E. V. Konoplianchenko, V. I. Melnyk, V. M. Vlasovets, G. V. Kirik, N. V. Tarelnyk, M. O. Mikulina, A. A. Kutakh, A. D. Polyvanyi, M. M. Mayfat, and A. N. Kalnaguz, Combined Electrospark Running-in Coatings of Bronze Parts. Part 3. Tribological Properties, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 43, No. 10: 1325—1334 (2021) (in Ukrainian)

79. Tarelnik, V.B., Martsynkovskii, V.S., Zhukov, A.N. Increase in the Reliability and Durability of Metal Impulse Seals. Part 3 (2017) *Chemical and Petroleum Engineering*, 53 (5-6), pp. 385-389. <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0351-5>

80. Tarelnyk, V.B., Gaponova, O.P., Konoplianchenko, Ye.V., Martsynkovskyy, V.S., Tarelnyk, N.V., Vasylenko, O.O. 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, (2019) *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 41 (1), pp. 47-69. <https://doi.org/10.15407/mfint.41.01.0047>

81. Tarelnyk, V., Martsynkovskyy, V., Gaponova, O., Konoplianchenko, I., Belous, A., Gerasimenko, V., Zakharov, M. New method for strengthening surfaces of heat treated steel parts (2017) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 233 (1), art. no. 012048. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/233/1/012048>

82. Tarelnyk, V., Martsynkovskyy, V., Gaponova, O., Konoplianchenko, I., Dovzyk, M., Tarelnyk, N., Gorovoy, S. New sulphiding method for steel and cast iron parts (2017) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 233 (1), art. no. 012049. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/233/1/012049>

83. Gaponova, O. et al. (2019). Estimating Qualitative Parameters of Aluminized Coating Obtained by Electric Spark Alloying Method. In: Pogrebnjak, A., Novosad, V. (eds) *Advances in Thin Films, Nanostructured Materials, and Coatings. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6133-3_25

84. N. V. Tarelnyk, Properties of Surfaces Parts from X10CrNiTi18-10 Steel Operating in Conditions of Radiation Exposure Retailored by Electrospark Alloying. I. Features of Topography and Mechanical Properties of Coatings, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 44, No. 8: 1037–1058 (2022) (in Ukrainian). DOI: 10.15407/mfint.44.08.1037

85. O. P. Gaponova and N. V. Tarelnyk, Properties of Surfaces Parts from X10CrNiTi18-10 Steel Operating in Conditions of Radiation Exposure Retailored by Electrospark Alloying. Pt. 2. Features of the Structural State of the Retailored Surfaces, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 44, No. 9: 1103–1115 (2022) (in Ukrainian). DOI: 10.15407/mfint.44.09.1103

86. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ie. V. Konoplianchenko, N. V. Tarelnyk, M. A. Mikulina, V. A. Gerasimenko, O. O. Vasylenko, V. M. Zubko, and V. I. Melnyk, Properties of Surfaces Parts from X10CrNiTi18-10 Steel Operating in

Conditions of Radiation Exposure Retailored by Electrosark Alloying. Pt. 3. X-ray Spectral Analysis of Retailored Coatings, Metallofiz. Noveishie Tekhnol., 44, No. 10: 1323–1333 (2022) (inUkrainian). DOI: 10.15407/mfint.44.10.1323

87. Пат. на корисну модель 155801 Україна, В23Н 1/06, (2006.01) Спосіб підвищення зносостійкості сталевих виробів / О.П. Гапонова, UA; Н.В. Тарельник, UA; В.Б. Тарельник, UA; Томаш Мосціський, PL; В.О. Охріменко UA О.І. Жиленко, UA; М.М. Майфат, UA; u 2023 04550заявл. 26.09.2023; опубл. 10.04.2024, Бюл. № 5.

88. Спосіб підвищення зносостійкості сталевих деталей обладнання, яке працює в умовах радіаційного випромінювання : пат. 152967 України на корисну модель, МПК (2023.01), В23Н 1/06. / Гапонова О.П., Тарельник Н.В., Тарельник В.Б., Жиленко Т.І., Мисливченко О.М., Дудченко В.В., Голуб Н.Р. –u 202203922; опубл. 03.05.2023, Бюл. № 18.

89. Спосіб підвищення зносостійкості робочих поверхонь сталевих кілець імпульсних торцевих ущільнень (ІТУ), які підлягають радіаційному опромінюванню : пат. 153145 України на корисну модель, МПК (2023.01), В23Н 9/00 / Гапонова О. П., Тарельник Н.В., Тарельник В. Б., Жиленко Т.І., Мисливченко О.М., Охріменко В.О., Голуб Н.Р. –u202204564; опубл. 24.05.2023, Бюл. № 21.

90. E. M. Prokhorenko, V. Klepikov, V. V. Lytvynenko, A. Zakharchenko, and M. Khazhmuradov, Problems of Atomic Science and Technology, No. 2:193 (2015).

91. V. V. Bryukhovetsky, V. F. KLeplikov, V. V. Lytvynenko, D. E. Myla, V. P. Poyda, A. V. Poyda, V. T. Uvarov, Yu. F. Lonin, and A. G. Ponomarev, Nucl. Instrum. MethodsPhys. Res. B, 499: 25 (2021).

92. S. E. Donets, V. F. Klepikov, V. V. Lytvynenko, Yu. F. Lonin, A. G. Ponomarev, O. A. Startsev, and V. T. Uvarov, Problems of Atomic Science and Technology, No. 4: 302 (2015).

93. V. F. Klepikov, V. V. Lytvynenko, Yu. F. Lonin, A. G. Ponomarev, O. G. Tolstolutskiy, V. V. Uvarov, and V. T. Uvarov, Problems of Atomic Science and Technology, No. 1: 119 (2009).

94. A. G. Kobets, P. R. Horodek, O. A. Startsev, V. V. Lytvynenko, Yu. F. Lonin, A. G. Ponomarev, and V. T. Uvarov, *Surf. Eng. Applied Electrochemistry*, **51**: 478 (2015).
95. ДСТУ 3925-99. Чавун з кулястим графітом для виливків. Марки. – К.: Держстандарт України. – 2000 р. – 13 с.
96. Мовчан В. П., Бережний М. М. Основи металургії. – Дніпропетровськ: Пороги. 2001. 336 с.
97. Українська радянська енциклопедія : у 12 т. / гол. ред. М. П. Бажан ; редкол.: О. К. Антонов та ін. — 2-ге вид. — К. : Головна редакція УРЕ, 1974–1985.
98. Калин Н.А. Спосіб холодного зварювання чавуну // Східно-Європейський журнал передових технологій. – №2, 2008. – С.19-21.
99. Калін М.А. Нові матеріали і технології для зварювання чавуну [Текст]: Монографія. – Харків: Видавництво «НТМТ», 2009. – 85 с.
100. Тарельник В.Б., Довжик М.Я., Белоус А.В. та ін. Розробка технології ремонту великогабаритних чавунних деталей на прикладі діафрагми компресора «PLC» // Materiały VI konferencji naukowo-technicznej TEROTECHNOLOGIA-2009, (Targi–Kielce, 29–30 września). – Targi–Kielce [Польща], 2009. – С. 406–415.
101. Yu. S. Samotugina, B. A. Lyashenko, and O. O. Bezumova, 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 (2021) (in Ukrainian), DOI: 10.15407/mfint.43.08.1105.
102. Шиліна О.П. Зміцнення сталевих та чавунних деталей термореагуючими сумішами // ВМТ, вип. 2, Січ 2017, с. 115–119.
103. Гурей Т.А. Підвищення зносостійкості чавунних деталей поверхневим зміцненням. // Вестник ХНАДУ, вип. 74, 2016.-С.48-52.
104. Скобло Т.С., Сідашенко О.І., Сайчук О.В. Корпусні деталі з чавунів та їх якісні показники: Монографія / Під ред. д.т.н. проф. Скобло Т.С. – Х: Діса плюс, 2019. – 282 с.
105. Скобло Т.С., Автухов А.К., Сідашенко О.І., Ключко О.Ю., Белкін Ю.Л., Соколов Р.Г. Спосіб виробництва прокатних валків: пат. Україна №105761 МПК

B22D 23/00, B21B 27/00. u2015 07442. заявл. 24.07.2015.; опубл. 11.04.2016., Бюл. № 7.

106. Іванкова О. В., Гаращук О. В., Куценко В. І., Щербина В. В., Чижевський Д. В., Бабич Я. В., Тіхонов М. О. Дослідження методів відновлення зношених деталей сільськогосподарської техніки. // Вісник ПДАА. 2020. № 4. С. 283–292.

107. 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

108. 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

109. Student, M. M., Hvozdet'skyi, V. M., Stupnytskyi, 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

110. Gvozdecki, V. M. (2018). Electric arc restorative and protective coatings from cored wires. *Visnik Nacional'noi' Akademii' Nauk Ukraini*, **03**, 79–84. doi: 10.15407/visn2018.03.079

111. Lyashenko, B. A., Solovykh, Ye. K., & Mirnenko, V. I. (2010). Optimizatsiya tekhnologii naneseniya pokrytiy po kriteriyam prochnosti i iznosostoykosti. – Kyiv: IPP NAN Ukrainy.

112. Skoblo, T. S., Rybalko, N. N., Tykhonov, A. V., & Martynenko, A. D. (2019). Analyz sposobov yz-hotovleniyya, uprochneniyya y vosstanovleniyya lap kul'tyvatora. *Tekhnichnyy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta Transportnoho Kompleksiv*, **15**, 60–85 [In Ukrainian].

113. 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

114. 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.

115. 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. Improving Ecological Safety when Forming Wear-Resistant Coatings on the Surfaces of Rotation Body Parts of 12Kh18N10T Steel Using a Combined Technology Based on Electrosark Alloying *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, **57**: 173 (2021). <https://doi.org/10.3103/S1068375521020113>

116. Tarelnyk V.B., Gaponova O.P., Konoplianchenko Ye.V., Martsynkovskyy V.S., Tarelnyk N.V., and Vasylenko O.O. Improvement of Quality of the Surface Electroerosive Alloyed Layers by the Combined Coatings and the Surface Plastic Deformation. III. The Influence of the Main Technological Parameters on Microgeometry, Structure and Properties of Electrolytic Erosion Coatings. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 3: 313–335 (2019), <https://doi.org/10.15407/mfint.41.03.0313>

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

118. 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>

119. Brendamari Rodriguez Biomaterials for orthopedics / Brendamari Rodriguez, Annette Romero, Omar Soto and Oswaldo de Varorna // Applications of Engineering Mechanics in Medicine - GED – University of Puerto Rico, May 2004. P. 5-15.

120. Tarelnyk V., Konoplianchenko I., Gaponova O., Sarzhanov B. Assessment of Hydroabrasive Wear Resistance of Construction Materials with Functional Coatings,

which are Formed by Resource-Saving and Environmentally Friendly Technologies.
Key Engineering Materials. 2020. vol 864, p. 265–277.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.864.265>

Додаткова література

121. Ліпич Л. Г., Геліч Н. В. Розвиток системи управління якістю продукції машинобудівних підприємств : [Текст] монографія / Любов Григорівна Ліпич, Наталія Вадимівна Геліч. – Луцьк : Волин. нац. ун-т ім. Лесі Українки, 2010. – 200 с. ISBN 978-966-600-503-1

122. Стандарт ISO 8402–86 Качество. Словарь [введен 01.10.1986]. – Киев: Держстандарт Украины, 1995. – 12 с.

123. Системи управління якістю. Основні положення та словник (ISO 9000:2000, IDT) : ДСТУ ISO 9000-2001. – [Чинний від 2001-01-10]. – К. : Держстандарт України, 2001. – VI. – 27 с.

124. А.Б. Немченко, І.В. Ніраз. Методологія системного підходу в управлінні організацією Наукові записки, вип.10, част.І - С. 275-279.

125. Суздаль Є. Г. Теорія систем і системний аналіз. СПб. : СПб Гуті, 2010.

126. Грабченко А.І., Федорович В.О., Гаращенко Я.М. Методи наукових досліджень: Навч. посібник. – Х.: НТУ "ХПІ", 2009. – 142 с.

127. Стеченко Д. М., Чмир О. С. Методологія наукових досліджень. – К. : Знання, 2007. – 317 с

128. Ковальчук В. В. Основи наукових досліджень : Навч. посіб. / В. В. Ковальчук, Л. М. Моїсєєв. – 2-ге вид., переробл. і допов. – К. : ВД «Професіонал», 2004. – 216 с

129. Вазинський С.Е., Щербак Т. І. Методика та організація наукових досліджень : Навч. посіб. / С. Е. Вазинський, Т. І. Щербак. – Суми: СумДПУ імені А. С. Макаренка, 2016. – 260 с.

130. Жуков О. М. Підвищення ефективності виготовлення елементів торцевих імпульсних ущільнень турбомашин нанесенням функціональних покриттів [Електронний ресурс] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.02.08 / Олексій Миколайович Жуков ; [наук. керівник Тарельник В. Б.] ; Сум. нац. аграр. ун-т. – Харків, 2019. – 25 с. – Бібліогр.: с. 17-22. – укр. 131. Івченко

132. Білоус А.В. Проблема виготовлення захисних втулок масляних ущільнень відцентрових машин/Б. Антошевський, В.Б. Тарельник, А.В.Білоус // «Ущільнення та ущільнювальні технології машин та механізмів»: 11-а Міжнародна науково-техн. конф. : зб. статей. - Вроцлав-Кудова Здрой, 2007. - С. 129-135. 133. Cardarelli Francois. Materials Handbook : a concise desktop reference. – [2-nd ed.] - London: Springer, 2008. – P.1340

134. Белоус А.В. Забезпечення якості робочих поверхонь деталей відцентрових компресорів із застосуванням інтегрованих технологій. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.- Харків – 2011.- 20 с.

135. Бондаренко Г. А. Компресорні станції : підручник / Г. А. Бондаренко, Г. В. Кирик. – Суми : Сумський державний університет, 2016. – 385 с.

136. Paul C. Halon Compressor Handbook / ISBN 0-07- 026005-2 / Mc Grow-Hill/2001. – 754 с.

137. Залога В.О. Курс лекцій «Інструментальні матеріали для лезових інструментів». Розділ «Інструментальні матеріали»: Навчальний посібник.- Суми: Вид-во СумДУ, 2007. - 206 с.

138. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, V. I. Melnyk, N. V. Tarelnyk, V. M. Zubko, V. M. Vlasovets, Ie. V. Konoplianchenko, S. G. Bondarev, O. V. Radionov, M. M. Mayfat, V. O. Okhrimenko, and A. V. Tkachenko, 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., 45, No. 5: 663—686 (2023) <https://doi.org/10.15407/mfint.45.05.0663> (in Ukrainian)

139. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, N. V. Tarelnyk, Ie. V. Konoplianchenko, S. G. Bondarev, O. V. Radionov, M. M. Mayfat, A. V. Okhrimenko, M. Yu. Dumanchuk, and K. G. Sirovitskiy, 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. 2. Wear Resistance, Topographic and Mechanical Properties, Metallofiz. Noveishie

Tekhnol., 45, No. 6: 773—794 (2023) <https://doi.org/10.15407/mfint.45.06.0773> (in Ukrainian)

140. Tarelnyk, N. V., Gaponova, O. P., Maifat M. M., Vasylenko, M. Y., Heiko, T. O. (2023). Problems and prospects for solving the issues of increasing the durability of machine parts operating under conditions of hydroabrasive wear // Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes, (4 (54), 47-54. <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.4.8>

141. Maifat M. M., Tarelnyk, N. V., Gaponova, O. P., Radionov, O. V., & Tarelnyk, V. B. (2023). Improvement of the technology of processing the friction pair «bearing insert – shaft neck» // Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes, (1 (51), 53-58. <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.1.9>

142. Тарельник Н.В., Майфат М.М. Захист деталей з високоміцного чавуну від гідроабразивного зносу комбінованими екологічно безпечними методами. "Наукові нотатки" Луцького національного технічного університету, випуск 76, 2023. С 66-71.

143. Тарельник Н.В., Майфат М.М. Новий спосіб захисту сталевих деталей від гідроабразивного зносу екологічно безпечними технологічними методами. Вісник Херсонського національного технічного університету, № 4/87, 2023. С 165-172.

144. Тарельник В.Б., Майфат М.М., Доценко А.О. Удосконалення методу системного підходу вибору технологій потрібної якості поверхонь шарів деталей машин, що працюють в умовах гідроабразивного зношування// XX-й Міжнародний форум молоді "Молодь і індустрія 4.0 В XXI столітті". Збірка матеріалів форуму. – Харків: ДБТУ. 2024. С. 132

145. Коноплянченко Є.В., Майфат М.М. Прогресивна технологія формування зносостійких покриттів на складнопрофільних поверхнях сталевих деталей // XX-й Міжнародний форум молоді "Молодь і індустрія 4.0 В XXI столітті". Збірка матеріалів форуму. – Харків: ДБТУ. 2024. С. 133

146. Лебець А.В., Майфат М.М. Дослідження технології електроконтактного зміцнення для підвищення зносостійкості робочих

поверхонь деталей машин // Технології XXI сторіччя: Збірник тез за матеріалами 26-ої міжнародної науково-практичної конференції (7-9 грудня 2020 р.). Ч.1. – Суми: СНАУ, 2020 – С. 134-135

147. Tarelnyk V.B., Konoplianchenko Ie.V., Mayfat M.M., Kozynskyi A.G. Technological support of bronze parts working surfaces tribological properties // *Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво : матеріали XX Міжнародної науково-технічної конференції (м. Суми, 29 вересня – 1 жовтня 2021 року) / редкол.: В. О. Залога, В. О. Іванов. – Суми : Сумський державний університет, 2021. – С. 19-20*

148. Пермяков О.А., Тарельник В.Б., Тарельник Н.В., Майфат М.М. Підвищення довговічності деталей машин, працюючих в умовах гідроабразивного зношування. XII Міжнародної науково-технічної конференції "Прогресивні технології в машинобудуванні", 5-9 лютого 2024 р. Івано-Франківськ, Яремче, С.133-134.

149. Пат. на корисну модель 155801 Україна, В23Н 1/06, (2006.01) Спосіб підвищення зносостійкості сталевих виробів / О.П. Гапонова, UA; Н.В. Тарельник, UA; В.Б. Тарельник, UA; Томаш Мосціцький, PL; В.О. Охріменко UA О.І. Жиленко, UA; М.М. Майфат, UA; и 2023 04550заявл. 26.09.2023; опубл. 10.04.2024, Бюл. № 5.

150. Пат. на корисну модель 155798 Україна, МПК (2024.01) В23Н 9/00 В23Н 5/00; Спосіб захисту чавунних деталей від гідроабразивного зносу / В.Б. Тарельник, UA; О.П. Гапонова, UA; Н.В. Тарельник, UA; М.О. Мікуліна UA; О.М. Лавренко UA; М.М. Майфат, UA; В.О. Охріменко UA О.І. Жиленко, UA; М.М. Майфат, UA; А.О. Білий, UA; и 2023 04255; заявл. 08.09.2023; опубл. 10.04.2024, Бюл. № 15.

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

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. V. B. Tarellyk, O. P. Gaponova, V. I. Melnyk, N. V. Tarellyk, V. M. Zubko, V. M. Vlasovets, Ie. V. Konoplianchenko, S. G. Bondarev, O. V. Radionov, M. M. Mayfat, V. O. Okhrimenko, and A. V. Tkachenko, 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., 45, No. 5: 663—686 (2023) <https://doi.org/10.15407/mfint.45.05.0663> (in Ukrainian)

2. V. B. Tarellyk, O. P. Gaponova, N. V. Tarellyk, Ie. V. Konoplianchenko, S. G. Bondarev, O. V. Radionov, M. M. Mayfat, A. V. Okhrimenko, M. Yu. Dumanchuk, and K. G. Sirovitskiy, 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. 2. Wear Resistance, Topographic and Mechanical Properties, Metallofiz. Noveishie Tekhnol., 45, No. 6: 773—794 (2023) <https://doi.org/10.15407/mfint.45.06.0773> (in Ukrainian)

3. O. P. Gaponova, V. B. Tarellyk, V. S. Martsynkovskyy, Ie. V. Konoplianchenko, V. I. Melnyk, V. M. Vlasovets, G. V. Kirik, N. V. Tarellyk, M. O. Mikulina, A. A. Kutakh, A. D. Polyvanyi, M. M. Mayfat, and A. N. Kalnaguz, Combined Electrospark Running-in Coatings of Bronze Parts. Part 3. Tribological Properties, Metallofiz. Noveishie Tekhnol., 43, No. 10: 1325—1334 (2021) (in Ukrainian)

4. Tarellyk, N. V., Gaponova, O. P., Maifat M. M., Vasylenko, M. Y., Heiko, T. O. (2023). Problems and prospects for solving the issues of increasing the durability of machine parts operating under conditions of hydroabrasive wear // Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes, (4 (54), 47-54. <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.4.8>

5. Maifat M. M., Tarelnyk, N. V., Gaponova, O. P., Radionov, O. V., & Tarelnyk, V. B. (2023). Improvement of the technology of processing the friction pair «bearing insert – shaft neck» // Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes, (1 (51), 53-58. <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.1.9>

6. Тарельник Н.В., Майфат М.М. Захист деталей з високоміцного чавуну від гідроабразивного зносу комбінованими екологічно безпечними методами. "Наукові нотатки" Луцького національного технічного університету, випуск 76, 2023. С 66-71.

7. Тарельник Н.В., Майфат М.М. Новий спосіб захисту сталевих деталей від гідроабразивного зносу екологічно безпечними технологічними методами. Вісник Херсонського національного технічного університету, № 4/87, 2023. С 165-172.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Тарельник В.Б., Майфат М.М., Доценко А.О. Удосконалення методу системного підходу вибору технологій потрібної якості поверхонь шарів деталей машин, що працюють в умовах гідроабразивного зношування// XX-й Міжнародний форум молоді "Молодь і індустрія 4.0 В XXI столітті". Збірка матеріалів форуму. – Харків: ДБТУ. 2024. С. 132

9. Коноплянченко Є.В., Майфат М.М. Прогресивна технологія формування зносостійких покриттів на складнопрофільних поверхнях сталевих деталей // XX-й Міжнародний форум молоді "Молодь і індустрія 4.0 В XXI столітті". Збірка матеріалів форуму. – Харків: ДБТУ. 2024. С. 133

10. Лебець А.В., Майфат М.М. Дослідження технології електроконтактного зміцнення для підвищення зносостійкості робочих поверхонь деталей машин // Технології XXI сторіччя: Збірник тез за матеріалами 26-ої міжнародної науково-практичної конференції (7-9 грудня 2020 р.). Ч.1. – Суми: СНАУ, 2020 – С. 134-135

11. Tarelnyk V.B., Konoplianchenko Ie.V., Mayfat M.M., Kozynskyi A.G. Technological support of bronze parts working surfaces tribological properties //

Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво : матеріали XX Міжнародної науково-технічної конференції (м. Суми, 29 вересня – 1 жовтня 2021 року) / редкол.: В. О. Залога, В. О. Іванов. – Суми : Сумський державний університет, 2021. – С. 19-20

12. Пермяков О.А., Тарельник В.Б., Тарельник Н.В., Майфат М.М. Підвищення довговічності деталей машин, працюючих в умовах гідроабразивного зношування. XII Міжнародної науково-технічної конференції "Прогресивні технології в машинобудуванні", 5-9 лютого 2024 р. Івано-Франківськ, Яремче, С.133-134.

Список патентів:

13. Пат. на корисну модель 155801 Україна, В23Н 1/06, (2006.01) Спосіб підвищення зносостійкості сталевих виробів / О.П. Гапонова, UA; Н.В. Тарельник, UA; В.Б. Тарельник, UA; Томаш Мосціцький, PL; В.О. Охріменко UA О.І. Жиленко, UA; М.М. Майфат, UA; и 2023 04550заявл. 26.09.2023; опубл. 10.04.2024, Бюл. № 5.

14. Пат. на корисну модель 155798 Україна, МПК (2024.01) В23Н 9/00 В23Н 5/00; Спосіб захисту чавунних деталей від гідроабразивного зносу / В.Б. Тарельник, UA; О.П. Гапонова, UA; Н.В. Тарельник, UA; М.О. Мікуліна UA; О.М. Лавренко UA; М.М. Майфат, UA; В.О. Охріменко UA О.І. Жиленко, UA; М.М. Майфат, UA; А.О. Білий, UA; и 2023 04255; заявл. 08.09.2023; опубл. 10.04.2024, Бюл. № 15.

15. Пат. на корисну модель 155984 Україна, МПК (2024.01) В23Н 9/00 В23Н 5/00; Спосіб захисту сталевих деталей від гідроабразивного зносу / В.Б. Тарельник, UA; О.П. Гапонова, UA; Н.В. Тарельник, UA; М.О. Мікуліна UA; О.М. Лавренко UA; М.М. Майфат, UA; В.О. Охріменко UA О.І. Жиленко, UA; Доценко А.О., UA; А.О. Білий, UA; и 2023 04251; заявл. 08.09.2023; опубл. 24.04.2024, Бюл. № 17.

ДОДАТОК Б
ДОКУМЕНТИ ПРО ОХОРОНУ ПРАВ НА ВІНАХОДИ ТА КОРИСНІ
МОДЕЛІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Додаток Б.1



(11) 155798

(19) UA

(51) МПК (2024.01)
B23H 9/00
B23H 5/00

(21) Номер заявки: **u 2023 04255**

(22) Дата подання заявки: **08.09.2023**

(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: **11.04.2024**

(46) Дата публікації відомостей про державну реєстрацію та номер Бюлетеня: **10.04.2024, Бюл. № 15**

(72) Винахідники:
Тарельник В'ячеслав Борисович, UA,
Гапонова Оксана Петрівна, UA,
Тарельник Наталія В'ячеславівна, UA,
Мікуліна Марина Олександрівна, UA,
Лавренко Олександр Максимович, UA,
Майфат Микола Миколайович, UA,
Доценко Артем Олексійович, UA,
Білий Олександр Євгенійович, UA

(73) Володілець:
Тарельник Наталія В'ячеславівна,
вул. Холодноярської бригади,
буд. 20, кв. 70, м. Суми, 40030,
UA

(54) Назва корисної моделі:

СПОСІБ ЗАХИСТУ ЧАВУННИХ ДЕТАЛЕЙ ВІД ГІДРОАБРАЗИВНОГО ЗНОСУ

(57) Формула корисної моделі:

1. Спосіб захисту чавунних деталей від гідроабразивного зносу, що включає шліфовку поверхонь деталей, алітування методом електроіскрового легування, який **відрізняється** тим, що на алітовану поверхню наносять електроіскрове покриття електродом-інструментом з композиційного зносостійкого матеріалу 90 %BK6 + 10 %1M при енергії розряду, $W_p=0,13-3,4$ Дж, після цього на покриття з композиційного зносостійкого матеріалу 90 %BK6 + 10 %1M наносять металополімерний матеріал, попередньо армований порошком, і після полімеризації частину шару металополімерного матеріалу видаляють проточуванням до виступів шорсткості покриття з композиційного зносостійкого матеріалу 90 %BK6 + 10 %1M.
2. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що композиційний зносостійкий матеріал 90 %BK6 + 10 %1M, отриманий за допомогою порошкової металургії, складається з 10 % тонкодисперсної суміші 1M - 70 % Ni, 20 % Cr, 5 % Si, 5 % B та 90 % суміші BK6.
3. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що порошки WC, ZrN і їх суміші додають в двокомпонентну епоксидну систему, наповнену феросиліконом марки Loctite 3478.
4. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що як армований порошок використано карбід вольфраму WC, при цьому концентрація армувальної речовини WC становить ~ 80 %.
5. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що як армований порошок використано нітрид цирконію ZrN, при цьому концентрація армувальної речовини ZrN становить ~ 80 %.
6. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що як армований порошок використана суміш карбиду вольфраму WC і нітриду цирконію ZrN, при цьому концентрація армувальної речовини суміші порошків WC+ZrN становить 40 % WC + 40 % ZrN.
7. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що при нанесенні композиційного зносостійкого матеріалу 90 %BK6 + 10 %1M використовують енергію розряду $W_p=3,4$ Дж.

Додаток Б.2



(11) 155801

(19) UA

(51) МПК
B23H 1/06 (2006.01)

(21) Номер заявки: u 2023 04550

(22) Дата подання заявки: 26.09.2023

(24) Дата, з якої є чинними
права інтелектуальної
власності: 11.04.2024(46) Дата публікації відомостей
про державну реєстрацію
та номер Бюлетеня: 10.04.2024,
Бюл. № 15(72) Винахідники:
Гапонова Оксана Петрівна,
UA,
Тарельник Наталія
В'ячеславівна, UA,
Тарельник В'ячеслав
Борисович, UA,
Томаш Мосціцький, PL,
Охріменко Віктор
Олександрович, UA,
Жиленко Олександр
Іванович, UA,
Майфат Микола
Миколайович, UA(73) Володілець:
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ,
вул. Римського-Корсакова,
буд. 2, м. Суми, Сумська обл.,
40007, UA

(54) Назва корисної моделі:

СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ ВИРОБІВ

(57) Формула корисної моделі:

1. Спосіб підвищення зносостійкості сталевих виробів, який включає нанесення методом електроіскрового легування (ЕІЛ) компактным електродом-інструментом на зношувану поверхню сталевих виробів зносостійкого композитного покриття складу 1М (70 % Ni, 20 % Cr, 5 % Si, 5 % B), який відрізняється тим, що зносостійке композитне покриття на зношуваній поверхні отримують, використовуючи спеціальне технологічне середовище (СТС), до складу якого входять 5 % Si + 5 % B + 90 % вазелін, яке наносять на зношувану поверхню сталевих виробів, а процес ЕІЛ здійснюють компактным електродом-інструментом з ніхромового дроту Х20Н80.
2. Спосіб за п. 1, який відрізняється тим, що ЕІЛ здійснюють при енергії розряду $W_p=0,52-2,60$ Дж.
3. Спосіб за пп. 1, 2, який відрізняється тим, що ЕІЛ здійснюють при продуктивності 1,0-2,0 $\text{см}^2/\text{хв}$.

Додаток Б.3



(11) 155984

(19) UA

(51) МПК (2024.01)
B23H 9/00
B23H 5/00

(21) Номер заявки: **u 2023 04251**

(22) Дата подання заявки: **08.09.2023**

(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: **25.04.2024**

(46) Дата публікації відомостей про державну реєстрацію та номер Бюлетеня: **24.04.2024, Бюл. № 17**

(72) Винахідники:
Тарельник В'ячеслав Борисович, UA,
Гапонова Оксана Петрівна, UA,
Тарельник Наталія В'ячеславівна, UA,
Мікуліна Марина Олександрівна, UA,
Лавренко Олександр Максимович, UA,
Майфат Микола Миколайович, UA,
Доценко Артем Олексійович, UA,
Білий Олександр Євгенійович, UA

(73) Володілець:
Тарельник Наталія В'ячеславівна,
вул. Холодноярської бригади,
буд. 20, кв. 70, м. Суми, 40030,
UA

(54) Назва корисної моделі:

СПОСІБ ЗАХИСТУ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ ВІД ГІДРОАБРАЗИВНОГО ЗНОСУ

(57) Формула корисної моделі:

1. Спосіб захисту сталевих деталей від гідроабразивного зносу, що включає підготовку поверхонь - шліфовку сталевих деталей, нанесення комбінованого електроіскрового покриття - цементацію методом електроіскрового легування, алітування методом електроіскрового легування, який **відрізняється** тим, що на алітовану поверхню наносять електроіскрове покриття електродом-інструментом з композиційного зносостійкого матеріалу 90 % BK6 та 10 % 1M при енергії розряду $W_p=0,13-3,4$ Дж, після цього на покриття з композиційного зносостійкого матеріалу 90 % BK6 та 10 % 1M наносять металополімерний матеріал, попередньо армований порошком, і після полімеризації частину шару металополімерного матеріалу видаляють проточуванням до виступів шорсткості покриття з композиційного зносостійкого матеріалу 90 % BK6 та 10 % 1M.
2. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що композиційний зносостійкий матеріал 90 % BK6 та 10 % 1M, отриманий за допомогою порошкової металургії, складається з 10 % тонкодисперсної суміші 1M - 70 % Ni, 20 % Cr, 5 % Si, 5 % B та 90 % суміші BK6.
3. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що як армований порошок використовують порошки у вигляді карбіду вольфраму WC, нітриду цирконію ZrN і їх суміші, які додають в двокомпонентну епоксидну систему, наповнену феросиліконом марки Loctite 3478.
4. Спосіб за п. 3, який **відрізняється** тим, що концентрація армувальної речовини WC становить ~ 80 %.
5. Спосіб за п. 3, який **відрізняється** тим, що концентрація армувальної речовини ZrN становить ~ 80 %.
6. Спосіб за п. 3, який **відрізняється** тим, що концентрація армувальної речовини суміші порошоків WC та ZrN становить 40 % WC та 40 % ZrN.
7. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що при нанесенні композиційного зносостійкого матеріалу 90 % BK6 та 10 % 1M використовують енергію розряду $W_p=3,4$ Дж.

ДОДАТОК В
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ
Додаток В.1

Акт
впровадження результатів дисертаційної роботи аспіранта СНАУ
Майфата Миколая Миколайовича на виробництві атомних насосів АТ
«Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання-інжиніринг»

Дійсний акт складено про те, що в умовах виробництва АТ «СМНВО-Інжиніринг» була здійснена промислова апробація наукових результатів, отриманих аспірантом кафедри технічного сервісу СНАУ Майфатом М.М. А саме було впроваджено в виробничий процес технологію зміцнення металорізального інструмента методом електроіскрового легування (ЕІЛ).

В процесі проведення порівняльних іспитів встановлено, що з метою підвищення зносостійкості металорізального інструмента з швидкорізальної сталі Р6М5, який використовують при обробці деталей з важкооброблюваних матеріалів доцільно в якості матеріалу електроду на установках з ручним вібратором моделей «УІЛВ-8А» і «Елітрон-22А» використовувати компактні електроди-інструменти з твердого сплаву ВК6, а поверхню що легують, обробляти спеціальним технологічним насичуючим середовищем складу 0,5%Si+0,5%B+2%Cr+7% Ni+90% вазелін. При цьому мікротвердість нанесеного покриття складає 14250-14600 МПа.

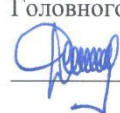
При порівняльних іспитах випробовували кінцеві фрези Ø 36 мм із сталі Р6М5 при фрезеруванні пазів в дисках з важкооброблюваної нержавіючої сталі 07Х16Н6 на верстаті з ЧПУ мод. 654Ф3. Фрези зміцнювалися методом ЕІЛ на установці моделі «Елітрон-22А» при енергії розряду $W_p = 0,3$ Дж і продуктивності $Q = 0,5$ см²/хв. В результаті було встановлено, зносостійкість фрез, зміцнених запропонованим методом в 1,7-2,3 рази вища незміцнених.

Очікуваний річний економічний ефект від використання впровадженої технології складає 75000 грн (сімдесят п'ять тисяч гривень).

Головний інженер
АТ «СМНВО-Інжиніринг»
Опроков В.В.
2024р.



Нач. Управління
Головного технолога
Доценко О.В.



Додаток В.2

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи аспіранта СНАУ Майфат Миколая Миколайовича на ТОВ «ТРІЗ ЛТД»

Дійсний акт складено про те, що в умовах ТОВ «ТРІЗ ЛТД» була здійснена промислова апробація наукових результатів, отриманих аспірантом кафедри технічного сервісу СНАУ **Майфат Миколаєм Миколайовичем**. А саме було впроваджено в виробничий процес технологію зміцнення і відновлення методом електроіскрового легування (ЕІЛ) поверхневих шарів захисної втулки (ЗВ) масляного ущільнення компресорів. Захисна втулка (рис. 1) є основною деталлю масляного ущільнення від працездатності і надійності якої безпосередньо залежить безпечна та безвідмовна робота всього компресорного агрегату. Пошкодження ущільнювального вузла відбувається внаслідок впливу ряду факторів: режиму роботи, властивості матеріалів герметизованого з'єднання та ущільнювача, допустимої межі витoku, ресурсу, токсичності та хімічній агресивності середовища тиску, температури тощо.



Рисунок 1 - Зовнішній вигляд ЗВ ущільнення до (а) і після (б) нанесення композиційного електроіскрового покриття.

ЗВ є тілом обертання, що складається з основи та зносостійкого покриття. У масляних ущільненнях компресорів хімічної та нафтової промисловості як матеріал основи ЗВ застосовується монель-метал – сплав на основі нікелю, що містить як основний легуючий елемент 27-37 % міді. Цей сплав має гарну корозійну стійкість, досить високу межу міцності і хорошу пластичність у гарячому та холодному станах.

Для збільшення ресурсу роботи ЗВ на робочу поверхню плазмовим напленням або вакуумним наплавленням наноситься зносостійкий матеріал на основі нікелю - Хастелою.

З часом матеріал ЗВ був замінений на пластичну і корозійностійку нержавіючу сталь 12Х18Н10Т, поверхневий шар якої зміцнювався методом електроіскрового легування. При цьому в якості електроду-інструменту використовували графіт. Тобто відбувалось насичення поверхні ЗВ вуглецем.

Висока температура, що супроводжує процес ЕІЛ дає підстави стверджувати, при легуванні графітовим електродом відбувається свого роду – цементация методом електроіскрового легування (ЦЕІЛ). Після ЦЕІЛ відбувається безабразивна ультразвукова фінішна обробка (БУФО).

Миколаєм Миколайовичем запропоновано при виготовленні і ремонті ЗВ і інших деталей, працюючих в умовах гідроабразивного зносу, з метою підвищення зносостійкості їх поверхневих шарів, застосовувати екологічно безпечну технологію, що включає: шліфування поверхонь, які підлягають обробленню; цементацию методом ЕІЛ; алітування алюмінієвим електродом-інструментом цементованої поверхні; наступне легування електродом, виготовленим методом порошкової металургії, з композиційного зносостійкого матеріалу 90%ВК6+10%ІМ; нанесення металополімерного матеріалу, армованого порошком нітриду цирконію (80%ZrN); шліфовку.

Порівняльними іспитами була доведена перспективність запропонованої технології. Зносостійкість зразків, зміцнених запропонованим способом на 150-200% вище незміцнених і на 20-30%, зміцнених методом ЦЕІЛ+БУФО.

Очікуваний річний економічний ефект від використання впровадженої технології зміцнення і відновлення поверхонь ЗВ, та інших деталей, працюючих в умовах гідроабразивного зносу, складає 193000 грн (сто дев'яносто три тисячі гривень).

Вказаний економічний ефект наведений з метою економічного обґрунтування отриманих наукових результатів, та не є приводом для виплати матеріального заохочення.

Директор ТОВ «ТРІЗ ЛТД»

к.т.н., доцент



В. С. Марцинковський

«02» квітня 2011р

Додаток В.3

Голова Наглядової ради

ВАТ «НВАТ ВНДІкомпресормаш»

к.т.н. П.Є. Жарков

«25» 03 2024 р.

Акт

**впровадження результатів дисертаційної роботи
аспіранта СНАУ Майфата Миколи Миколайовича на**

В умовах ВАТ «НВАТ ВНДІКОМПРЕСОМАШ» була здійснена промислова апробація наукових результатів, отриманих аспірантом СНАУ Майфатом Миколою Миколайовичем. А саме апробація розробленої екологічно-безпечної технології підвищення довговічності поверхневих шарів деталей гвинтових компресорів, працюючих в умовах гідроабразивного та інших видах зношування.

В процесі роботи ГК в основному зношуються посадкові місця під підшипники та робочі поверхні стрічок гвинтів. Знос, як правило, не перевищує 0,3 мм на діаметр, однак він може призвести до значного зниження продуктивності компресора, оскільки первісний зазор між гвинтами знаходиться на рівні 0,05 мм.

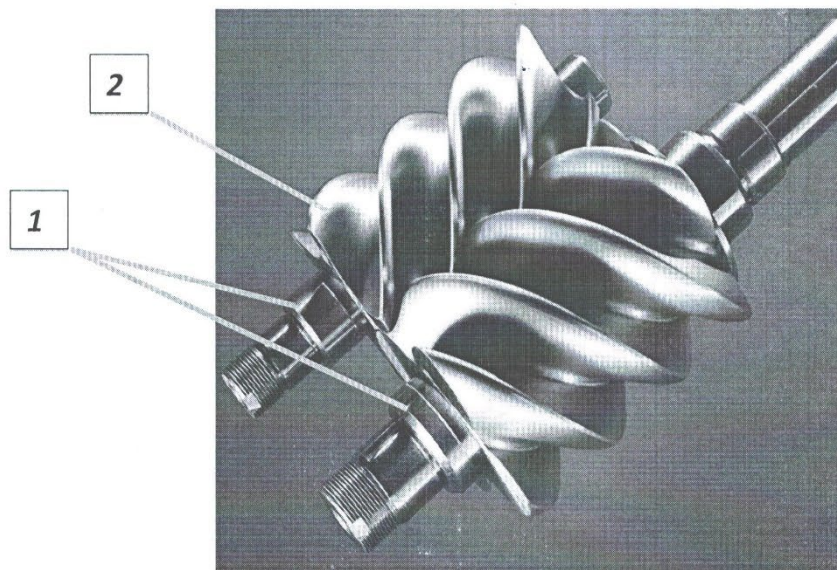


Рисунок 1- Місця зносу роторів гвинтового компресора: 1 – посадочні місця під підшипники; 2 - робочі поверхні стрічок.

Якщо в експлуатації мають місце тривала робота ГК на гарячому мастилі, якщо виробляються часті пуски і зупинки компресора, а також інші

перевантаження, посадкові місця під кулькові або роликові підшипники котіння, або самі підшипники можуть передчасно вийти з ладу. Це може спричинити аварію компресора, пов'язану із заклинюванням роторів (гвинтів) «схоплюванням» матеріалів гвинтів і корпусу, руйнуванням дотичних поверхонь гвинтів. Ремонт такого компресора може бути виконаний тільки в заводських умовах, а іноді потрібна заміна компресорного блоку на новий.

Щоб попередити подібні ситуації, необхідно періодично робити діагностичний огляд стану підшипників за допомогою спеціальних портативних приладів. Ця надійна апаратура цілком доступна. Вона повинна бути включена в обов'язковий інструмент експлуатаційних і ремонтних служб на підприємствах, що використовують компресорне устаткування.

У світовій практиці затвердилася система сервісного обслуговування протягом усього життєвого циклу – від покупки до списання. Сервісне обслуговування роблять спеціалізовані підрозділи фірм - виробників устаткування, розташованих у безпосередній близькості до споживачів. Так ВАТ «НВАТ ВНДІкомпресормаш» має три сервісних центри в промислових регіонах України.

На сьогодні для захисту поверхонь деталей, що працюють в важких умовах оточуючих середовищ і підлягають інтенсивному гідроабразивному зношенню, крім зміцнення поверхневих шарів, серед яких особливе місце займає хіміко-термічне оброблення, використовують інші методи: приварювання зносостійких пластин, напилювання і наплавлення твердими зносостійкими матеріалами, нанесення шлікерних покриттів, які є шкідливими для здоров'я людини і небезпечними для оточуючого середовища. Серед найбільш ефективних, енергоощадних і екологічно безпечних технологій нанесення захисних покриттів, особливе місце займає електроіскрове легування. В своїй дисертаційній роботі аспірантом Майфатом Миколаєм Миколайовичем доведено, що зносостійкі комбіновані покриття складу 90%BK6 + 10%IM, нанесені методом електроіскрового легування в комбінації з поверхневим пластичним деформуванням і нанесенням металопластичних матеріалів, армованих порошками твердих зносостійких матеріалів (карбідом вольфраму і нітридом цирконію) може забезпечити захист деталей від гідроабразивного і інших видів зносу.

Очікуваний річний економічний ефект від використання впровадженої технології складає 137000 грн (сто тридцять сім тисяч гривень).

Вказаний економічний ефект наведений з метою економічного обґрунтування отриманих наукових результатів, та не є приводом для виплати матеріального заохочення.