

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ ПЕТРА ВАСИЛЕНКА

**Гапонова Оксана Петрівна**



**УДК 669.056.99:621.793/.795:620.22.017(043.3)**

**КЕРУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЯМИ ПОВЕРХОНЬ  
СТАЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ ЕЛЕКТРОІСКРОВИМ ЛЕГУВАННЯМ  
У СПЕЦІАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩАХ**

Спеціальність 05.02.01 – матеріалознавство

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Сумському національному аграрному університеті Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант**

доктор технічних наук, професор  
**ТАРЕЛЬНИК В'ячеслав Борисович**,  
Сумський національний аграрний університет,  
завідувач кафедри технічного сервісу.

**Офіційні опоненти:**

лауреат Державної премії України,  
доктор технічних наук, професор  
**СКОБЛО Тамара Семенівна**,  
Харківський національний технічний університет  
сільського господарства імені Петра Василенка,  
професор кафедри технологічних систем  
ремонтного виробництва ім. О. І. Сідашенка;

доктор технічних наук, професор  
**УМАНСЬКИЙ Олександр Павлович**,  
Інститут проблем матеріалознавства  
ім. І. М. Францевича НАН України,  
завідувач відділу матеріалознавства та інженерії  
високостійких поверхневих шарів;

доктор технічних наук, професор  
**БРИКОВ Михайло Миколайович**,  
Національний університет «Запорізька політехніка»,  
професор кафедри обладнання  
та технології зварювального виробництва.

Захист відбудеться 27 квітня 2021 року о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.832.04 в Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44.

Автореферат розісланий 26 березня 2021 року.

**Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради**



**Є. І. Калінін**

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Висока енергоємність внутрішнього валового продукту України значно знижує конкурентоспроможність національного виробництва, підвищення якої можна домогтися лише за рахунок модернізації устаткування промисловості, зниження енергоємності вироблюваної продукції впровадження новітніх енергозберіжних, екологічно безпечних технологій.

Велика кількість відповідальних деталей вузлів тертя компресорів, турбодетандерів, вентиляторів, насосів, холодильних машин та машинних приводів, а також машин спеціалізованого застосування: дробарок, млинів, сепараторів, центрифуг та іншого динамічного обладнання (ДО), працює за високих швидкостей, тисків, температур, а також в умовах абразивного, корозійного та інших видів впливу робочих середовищ.

Підвищення режимних параметрів деякого ДО супроводжується розробленням нових композиційних матеріалів типу «основа – покриття», що поєднують у собі захисні властивості покриттів із механічною міцністю основи. На цей час при зміцненні поверхні виробів усе більшого значення набувають методи з використанням концентрованих потоків енергії. Серед них найбільш перспективною вважається технологія електроіскрового легування (ЕІЛ), яка привертає найбільшу увагу інженерів-технологів. Основними перевагами ЕІЛ порівняно з іншими методами є висока адгезія покриття з основою, можливість локального оброблення поверхні, екологічна безпека, відсутність деформацій та жолоблення, низькоенергоємне устаткування, що на порядок менше, ніж під час хіміко-термічного оброблення (ХТО), відсутність необхідності попередньої підготовки поверхні та ін. Значно розширити галузь застосування методу ЕІЛ для ширшого кола відповідальних деталей ДО можна за рахунок уведення між анодом (електродом-інструментом) і катодом (деталлю) спеціального технологічного середовища (СТС) у вигляді пасти, до складу якого входять необхідні легувальні елементи, необов'язково струмопровідні.

Технологія ЕІЛ може ефективно конкурувати, а інколи, залежно від вимог креслення, повністю замінювати такі методи ХТО, як цементація, металізація та ін., що потребують дорогого та об'ємного обладнання, є трудомісткими, тривалими за часом і найчастіше екологічно небезпечними. Мікрометалургійні процеси при ЕІЛ проходять за частки секунди, без розігрівання всієї маси деталі або, тим більше, відпалу її поверхні. При ХТО товщина легованого шару більша, ніж під час ЕІЛ, але такі деталі як вали, штоки, плунжери – в результаті жолоблення значно відхиляються від своєї осі (до 3 мм), зазвичай у різних площинах, їх необхідно піддавати правці під пресом, неодноразово відпалювати для зниження твердості й підвищення пластичності або шліфувати, знімаючи з поверхні значний шар металу, причому найбільш твердого. Метод ЕІЛ позбавлений цих недоліків та дозволяє створювати якісні покриття, що мають заданий комплекс фізико-механічних властивостей.

Хоча для ЕІЛ притаманна підвищена шорсткість поверхні та деякі інші недоліки, їх можна знизити або повністю усунути за рахунок поєднання з іншими зміцнювальними технологіями (лазерне оброблення, поверхневе пластичне деформування (алмазне вигладжування, обкатування кулькою) або безабразивним ультразвуковим фінішним обробленням (БУФО).

Таким чином, актуальним напрямком дослідження є створення енергоефективних та екологічно безпечних технологій отримання функціональних покриттів, що базуються на методі ЕІЛ з використанням спеціального технологічного середовища, оцінювання і прогнозування структурного стану поверхонь після їх оброблення.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана на кафедрі технічного сервісу Сумського національного аграрного університету (СНАУ) в рамках бюджетної теми Міністерства освіти і науки України «Розробка енергозберігаючих технологій для забезпечення експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей», номер держреєстрації 0116U002756, 2016–2017 рр.; Сумському державному університеті (СумДУ) в рамках бюджетних тем Міністерства освіти і науки України: «Науково-технологічні аспекти дизайну матеріалів», номер держреєстрації 0110U001770, 2010–2014 рр., «Сучасні технології розробки та отримання перспективних матеріалів і формоутворення виробів машинобудівної галузі», номер держреєстрації 0114U005445, 2014–2019 рр., «Розроблення та дослідження властивостей нових функціональних матеріалів», номер держреєстрації: 0120U101433, 2019–2024 рр., «KVP Welding Technologies», номер держреєстрації 09-12, 2019 р., «Аналіз впливу гідродинамічних сил, які діють у вузьких зазорах ущільнень та опор, на підвищення енергоефективності та зниження шкідливих викидів і вібрацій відцентрових машин», номер держреєстрації 0120U102004, 2020–2023 рр. та низки госпдоговорів, які були виконані за участі авторки.

**Мета роботи** – підвищення довговічності деталей динамічного обладнання шляхом керування структурою та властивостями сталених поверхонь за рахунок комплексного впливу електроіскрового легування із застосуванням СТС.

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

- проаналізувати і систематизувати способи підвищення якості робочих поверхонь деталей ДО;
- розробити методологію управління структуроутворенням сталених поверхонь під час їх оброблення методом ЕІЛ із застосуванням СТС;
- дослідити особливості формування структури та властивостей однокомпонентних покриттів, отриманих методом ЕІЛ із застосуванням СТС за різних режимів оброблення;
- встановити вплив складу СТС та режиму ЕІЛ на особливості формування структурно-фазового стану багатокомпонентних покриттів;
- розробити адекватну математичну модель прогнозування якості поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ з використанням СТС;
- розробити математичну модель формування електроіскрового покриття, що ґрунтується на методі фазової площини й статистичного аналізу, яка враховує параметри процесу ЕІЛ, а також перевірити її адекватність;
- дослідити залежності механічних і трибологічних властивостей модифікованих поверхонь від матеріалу легувальних електродів-інструментів, складу СТС, а також енергетичних режимів ЕІЛ і встановити найбільш ефективне їх поєднання;
- розробити наукові принципи практичної реалізації енергоефективних та екологічно безпечних технологій одержання функціональних покриттів, що

базуються на методі ЕІЛ з використанням СТС, в поєднанні з іншими методами підвищення якості поверхневих шарів деталей для подальшого впровадження у виробництво.

**Об'єкт дослідження** – процеси одержання на сталях покриттів для підвищення довговічності деталей ДО.

**Предмет дослідження** – закономірності формування структури та фазового складу покриттів із заданими властивостями, отриманих методом ЕІЛ із застосуванням СТС.

**Методи дослідження.** На основі методу системного аналізу досліджені конструкторсько-технологічні вимоги до деталей ДО, а також існуючі методи підвищення їх якості. Математична модель формування електроіскрового покриття, що базуються на методі фазової площини й статистичного аналізу, яка враховує параметри процесу ЕІЛ, а також модель прогнозування якості поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ, побудовані на основі фундаментальних положень фізики, фізичного металознавства, матеріалознавства. Лабораторні та промислові дослідження виконано на сучасному устаткуванні та вимірювальній апаратурі. Використовувалися сучасні методи досліджень: оптична та електронна мікроскопія, рентгеноструктурний і мікрорентгеноспектральний аналізи. Випробування з визначення комплексу характеристик: мікротвердість, показники міцності та пластичності, а також зносостійкості й жаростійкості отриманих покриттів – проведені за стандартними методиками.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

*Вперше:*

1. Одержано залежності особливостей формування фазового складу та структури обробленої поверхні вуглецевих сталей після формування однокомпонентних покриттів методом ЕІЛ з використанням СТС (алітування, цементация) та показано, що після оброблення досягається підвищення товщини та мікротвердості робочого шару.

2. Установлена можливість одержання сульфідованих шарів під час оброблення сталей поверхонь ЕІЛ з використанням СТС, що містить сірку, компактним графітовим електродом та електродом-інструментом із металевого дроту, що забезпечує поряд зі зміцненням меншу схильність поверхонь від схоплення деталей у спряженнях під час тертя.

3. Отримані азотовані та нітроцементовані поверхні сталей новим екологічно безпечним і менш енергозатратним методом ЕІЛ з використанням СТС. Установлений взаємозв'язок між структурою та параметрами ЕІЛ.

4. Проведено одночасне насичення сталі вуглецем, алюмінієм і бором методом ЕІЛ із застосуванням СТС. Установлено, що фазовий склад покриттів на сталях 20 і 40 представлений твердими розчинами ОЦК та ГЦК, інтерметалідом  $Fe_4Al_{13}$  і легованим бороцементитом  $Fe_3(CB)$ . Утворення цих фаз сприяє значному зміцненню і збільшенню мікротвердості поверхневого шару до 12 350 МПа.

5. Під час дослідження сульфомолібденових покриттів, отриманих методом ЕІЛ із застосуванням СТС, за допомогою рентгенографічного аналізу встановлена наявність дисульфиду молібдену як на поверхні (до 8 % за мас.), так і на глибині 15 мкм (до 5 % за мас.), що запобігає схоплюванню поверхонь тертя в

період припрацювання і сприяє підвищенню зносостійкості та довговічності деталей у трибоспряженнях.

б. Запропоновані рівняння прогнозування показників структури (товщини, суцільності), механічних властивостей (мікротвердості) та геометричних параметрів (шорсткості) однокомпонентних і багатокомпонентних покриттів, отриманих методом ЕІЛ із застосуванням СТС, від параметрів процесу ЕІЛ, що дозволяє цілеспрямовано встановлювати алгоритм подальшого впливу для забезпечення потрібних властивостей поверхні деталей ДО.

*Набуло подальшого розвитку* математичне моделювання формування покриття, що ґрунтується на методі фазової площини і статистичного аналізу. Розроблена модель описує особливості утворення покриттів під час ЕІЛ із застосуванням СТС. Побудовано фазові портрети температури та напруження від концентрації речовини, що показують існування стаціонарного стану системи «покриття-основа», та свідчать про дифузійний характер ЕІЛ покриттів.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розробки захищені 34 патентами, зокрема 13 на винахід, були виконані на підприємствах ТОВ «ТРИЗ», м. Суми (2019–2020 р.), АТ «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання» (2020 р.), ПАТ «Сумхімпром» (2020 р.), КП «Міськводоканал» (2019 р.), АТ «Сумський завод насосного та енергетичного машинобудування «НАСОСЕНЕРГОМАШ» (2020 р.), ТОВ «Науково-впровадницьке підприємство СУМИПЛАСТПОЛІМЕР» (2020 р.), кафедрі технічного сервісу Сумського національного аграрного університету, де для виконання нових технологій розроблені та затверджені спеціальні технічні умови.

Очікуваний економічний ефект від упровадження нових технологій, захищених патентами, становить 1 млн 171 тис. грн.

**Особистий внесок здобувача.** Теоретичні та експериментальні результати досліджень, що виносяться на захист, одержані автором самостійно та викладені в працях [12, 20, 21, 23, 81, 85, 91, 92, 96]. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, особистий внесок полягає в такому: встановлення закономірностей формування структури покриттів [1–18, 20–47, 49–64, 66–105, 107–110], проведення дюрOMETричних досліджень [1–18, 20–47, 49–64, 66–105, 107–110], підготовка зразків для проведення рентгенографічних та локального мікрорентгеноспектрального аналізу [1–9, 11, 12, 16–18, 21–23, 26–30, 34–39, 41–45, 47, 49–55, 57–67, 70–71, 73–79, 81–86, 91, 92, 95, 99, 105, 107], проведення випробувань на зносостійкість [5, 9, 13, 25, 29, 34, 42, 45, 47, 52, 66, 72, 74, 97–99, 107] і жаростійкість [3, 18, 20, 33, 43, 92, 100] покриттів, обґрунтування вибору матеріалів та методів дослідження, аналіз одержаних результатів [1–111], розроблення нових підходів до побудови математичної моделі процесів ЕІЛ, що базується на методі фазової площини і статистичного аналізу [4, 73, 78, 93], розроблення математичної моделі прогнозування якості поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ [1–3, 34, 35, 46, 61], дослідження та розроблення нових технологічних процесів моделювання і прогнозування структуроутворення та властивостей покриттів [1–3, 34, 35, 46, 61, 106, 109–111].

В отриманих патентах запропоновані нові способи оброблення робочих поверхонь деталей машин та інструменту методом ЕІЛ, а також матеріали й режими оброблення, визначені властивості отриманих покриттів [36–68], способи

прогнозування якісних параметрів покриттів [35, 46, 61].

У монографіях [1], [2] і [3] автором особисто розроблені матеріали п'ятого, третього та п'ятого розділів, відповідно.

**Апробація результатів роботи.** Основні положення й результати дисертаційної роботи розглядалися, обговорювалися та отримали позитивні відгуки на багатьох міжнародних науково-технічних і практичних конференціях у період 2016–2020 рр.: «Сучасні проблеми землеробської механіки», присвяченої 90-річчю Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка та 120-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка (м. Харків, Україна, 17–18 жовтня 2020 р.), «Actual problems of engineering mechanics» (м. Одеса, ОГАСА, 12–15 травня 2020 р.), «International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP)» (м. Одеса, Україна, 15–20 вересня 2019 р., 9–13 листопада 2020 р.), «2nd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange (DSMIE-2019)» (м. Луцьк, ЛНТУ, Україна, 11–14 червня 2019 р.), «8th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP 2018)» (Затока, Україна, 9–14 вересня 2018 р.), «International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)» (м. Одеса, ОНАЗ ім. О. С. Попова, Україна, 10-14 вересня 2018 р. та 9–13 вересня 2019 р.), «International Scientific and Engineering Conference Hermetic Sealing, Vibration Reliability and Ecological Safety of Pump and Compressor Machinery, HERVICON+PUMPS» (м. Суми, СумДУ, Україна, 5–8 вересня 2017 р. та 8–11 вересня 2020 р.), «Сучасні технології у промисловому виробництві» (м. Суми, СумДУ, квітень 2017–2020 рр.), «Сучасні технології в науці та освіті» (м. Сєверодонецьк, СНУ ім. Володимира Даля, Україна, лютий 2018 р., березень 2019 р., лютий 2020 р.), «Матеріали для роботи в екстремальних умовах» (м. Київ, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», грудень 2017–2020 рр.), «Проблеми надійності машин», присвяченої пам'яті академіка В. Я. Аніловича» (м. Харків, ХНТУСГ, 12–13 листопада 2019 р.), «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2018» (м. Дніпро, Національна металургійна академія України, 27–29 березня 2018 р.), «Системи розроблення та постановлення продукції на виробництво» (м. Суми, СумДУ, травень 2016, 2017 рр.), «Сучасні проблеми землеробської механіки» (м. Суми, СНАУ, 17–18 жовтня 2016 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 111 наукових працях, зокрема: 3 монографіях у співавторстві, 33 статтях в спеціалізованих наукових виданнях України і 6 статтях у закордонних виданнях; 25 статей входять до міжнародних наукометричних баз даних SCOPUS та/або Web of Science – [4–10, 13–18, 25–29, 34, 35, 106, 108–111]. Отримано 34 патенти (з яких 13 на винахід), опубліковано 35 матеріалів і тез у збірниках доповідей наукових конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається із вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи викладено на 568 сторінках, зокрема 12 додатків на 136 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 431 сторінка, 134 рисунків, 61 таблиця. Список використаних джерел налічує 359 найменувань на 47 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність і важливість теми дисертаційної роботи, сформульовано мету й завдання, визначено об'єкт і предмет дослідження, викладено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, окреслено особистий внесок автора.

**Перший розділ** присвячений аналізу сучасного стану досліджень щодо шляхів підвищення якості поверхневих шарів деталей машин ДО. Проведений аналіз причин втрати працездатності різних класів деталей машин ДО, що працюють у важких умовах експлуатації. До них застосовують значну кількість відповідних методів захисту від різних видів зношування. Основним завданням застосовуваних методів є підвищення якісних параметрів поверхневого шару, а саме: підвищення твердості та мікротвердості, зниження шорсткості, підвищення зносостійкості й відновлення зношених ділянок поверхонь, зміна величини і знака залишкових напружень, збільшення втомної міцності і т. ін. Крім того, під час вибору методу або комбінації з декількох методів необхідно віддавати перевагу економічно вигідним та екологічно безпечним. Метод ЕІЛ є одним із найбільш простих і доступних із технологічної точки зору. Про унікальний вплив ЕІЛ на формування структури та мікроструктури, властивості поверхні, а також на процеси тертя й зношування металів згадується в працях Б. Р. Лазоренка та Н. Й. Лазоренко, Б. Н. Золотих, А. Є. Гітлевича, В. В. Михайлова, А. Д. Верхотурова, С. М. Хімухіна, Т. С. Скобло, О. П. Уманського, І. О. Подчерняєвої, В. Б. Тарельника, В. Antoszewski, N. Radek та ін.

Аналіз літератури засвідчив, що ЕІЛ широко використовують для здійснення процесу цементації, металізації, нанесення твердих сплавів на поверхню. Особливий інтерес становлять методи насичення поверхні одним або одночасно кількома елементами із застосуванням нової технології – ЕІЛ з використанням СТС. Цей новий екологічно чистий і прогресивний метод потребує глибокого вивчення. Проведений аналіз підходів, застосовуваних для моделювання процесу формування покриття методом ЕІЛ. Незважаючи на значну кількість різнопланових і важливих праць, багато питань щодо моделювання процесу ЕІЛ залишаються відкритими. Відсутні залежності, що дозволяють оптимізувати та прогнозувати якість і властивості сформованого покриття. Актуальним є застосування синергетичних законів до такого фізичного прикладу самоорганізації, як ЕІЛ. Показано, що цей новий екологічно чистий і прогресивний метод потребує глибокого вивчення. Сформульовані основні завдання дисертаційної роботи та напрями їх вирішення.

У **другому розділі** наведено характеристику вихідних матеріалів, викладено методики дослідження, описано експериментальні установки. Запропонований підхід до розроблення методології створення і зміцнення робочих поверхонь деталей машин ДО методом ЕІЛ (рис. 1). Показана важлива роль вихідних матеріалів, СТС, матеріалу анода у взаємозв'язку з матеріалом катода в процесі створення методології отримання функціональних покриттів методом ЕІЛ. Обране устаткування для проведення ЕІЛ – це «ЕІЛ-8А», «ЕІЛ-9» і «Елітрон-52А» в діапазоні енергій розряду від 0,04 Дж до 6,8 Дж. Експериментальні дослідження проводили на зразках із сталей марок 20, 40, 40Х, 38Х2МЮА, 30Х13, 12Х18Н10Т, із яких виготовляють більшість деталей ДО. Запропонований склад вихідних матеріалів (СТС та електродних матеріалів) і розроблені технології отримання функціональних покриттів методом ЕІЛ – однокомпонентних (алітування,



цементация, сульфидування, азотування) та багатокомпонентних (нітроцементация, сульфоцементация, сульфоалітування, Al+C+S-, Al+C+B-, Mo+S-покриття, комбіновані C-Al-Ti5K6-покриття).

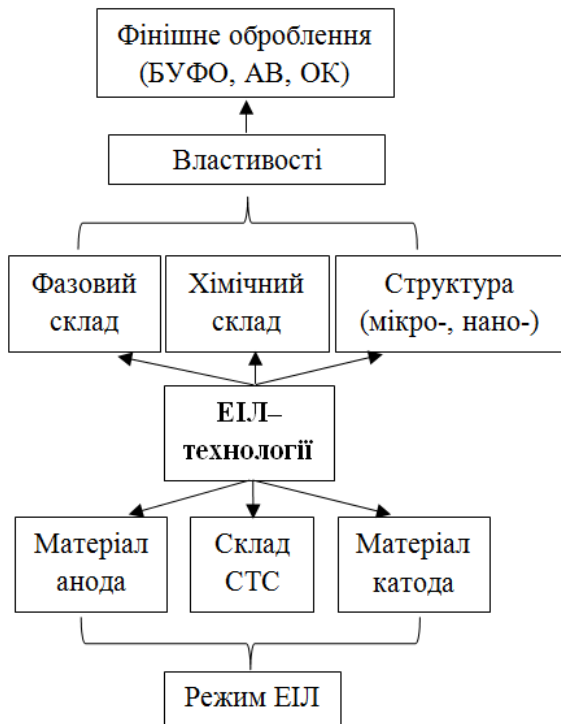


Рисунок 1 – Методологічна схема модифікування поверхні методом ЕІЛ із застосуванням СТС

Для вирішення поставлених завдань використовували сучасні методи випробувань і досліджень, зокрема: шорсткість поверхні зразків досліджували на приладі профілограф-профілометр мод. 201 заводу «Калібр»; топографію ділянок поверхні зразків після ЕІЛ вивчали за допомогою растрового електронного мікроскопа РЕММ-102; металографічні дослідження (мікроструктуру, будову покриття, товщину шарів, суцільність) проводили за допомогою оптичних мікроскопів «МІМ-7», «Неофот-2», растрового електронного мікроскопа РЕММ-102, сканувального електронного мікроскопа Jeol JSM-5400, оснащеного мікроаналізатором ISIS 300 Oxford instruments, сканувального електронного мікроскопа SEO-SEM Inspect S50-B, оснащеного енергодисперсійним спектрометром AZtecOne із детектором X-MaxN20 (виробник Oxford Instruments plc), за допомогою яких також проводили локальний

мікрорентгеноспектральний аналіз покриттів; рентенографічні дослідження проводили на дифрактометрах ДРОН-3 та AXRD Benchtop (виробник Proto Manufacturing Inc., США); випробування на жаростійкість алітованих покриттів проводили згідно з ГОСТом 6130-71; для експрес-оцінювання величини лінійного зношування зразків із покриттям було виготовлено установку на базі свердлильного верстата, особливість якої полягає в тому, що зразки закріплювали в пристосуванні, розміщеному на столі верстата, це забезпечувало їх самовстановлення; випробування на розтяг проводили згідно з ГОСТом 7855-84.

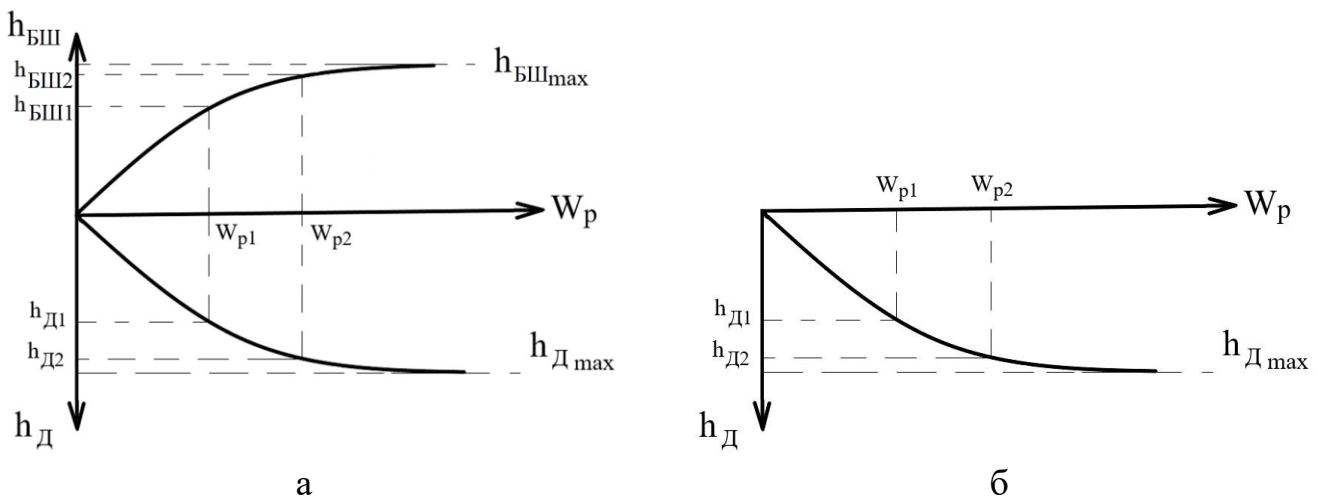
У **третьому розділі** описані особливості проходження дифузійних процесів під час ЕІЛ. Показано, що під час ЕІЛ металевих поверхонь залежно від природи анода можливе формування двох типів структур: лише дифузійних шарів без масоперенесення (наприклад, у разі цементації методом ЕІЛ) і з масоперенесенням (наприклад, алітування методом ЕІЛ). Покриття методом ЕІЛ можна формувати застосовуючи СТС регульованого складу, які наносять на катод у вигляді гелів, паст, обмазок тощо. Запропонована математична модель прогнозування якісних параметрів поверхневого шару, що дозволяє за енергетичними параметрами процесу ЕІЛ прогнозувати якісні параметри отриманих покриттів, які сформувалися за рахунок дифузійних процесів, а також дифузійних процесів і масоперенесення під час ЕІЛ із застосуванням СТС.

Шар, сформований на катоді, за глибиною можна поділити на дві зони: зону, в якій відбувається перемішування рідких фаз матеріалів електродів («білий шар»), і

зону, розміщену нижче від зони перемішування, в якій елементи матеріалу анода переносяться у твердій фазі (дифузійна зона). Розподіл хімічних елементів електродів у кожній із цих зон визначається фізичними процесами, що відрізняються за своєю природою, але залежать від кількості введеної в тіло енергії – від енергії розряду. Під час ЕІЛ, що супроводжується масоперенесенням матеріалу анода на поверхню підкладки (основи), структура отриманих покриттів буде складатися як мінімум із трьох ділянок: «білого шару», дифузійної зони та основного металу. Можливе утворення підшарів між «білим шаром» і дифузійною зоною. Особливістю цього процесу є те, що як матеріал анода застосовують метали і сплави. Під час ЕІЛ без масоперенесення формуються лише дифузійні шари. У разі використання під час ЕІЛ за анод графіту масоперенесення не відбувається. У цьому разі змінений шар формується в результаті дифузії вуглецю в оброблювану поверхню.

Необхідно зазначити, що дифузійні шари під час ЕІЛ можна формувати застосовуючи СТС регульованого складу, які наносять на поверхню катода. Водночас залежно від складу СТС можна отримувати лише дифузійні шари, коли за анод використовують графіт і вводять до складу СТС такі легувальні елементи, як вуглець, азот, сірку та ін., крім елементів металів. У цьому разі, змінений шар буде складатися з дифузійної зони різного хімічного і фазового складу залежно від коефіцієнтів дифузії дифундувальних елементів та основи.

Якщо до складу СТС входять метали, то на катоді формуються шари, структура яких складається з «білого шару» (БШ), дифузійної зони (Д) та основного металу. Якщо за величину ефективності процесу ЕІЛ взяти товщини «білого шару» і дифузійної зони, то залежність цих параметрів якості шару під час ЕІЛ від енергії розряду ( $W_p$ ) набирає вигляду, наведеного на рисунку 2.



а – масоперенесення анода і дифузія легувальних елементів матеріалу анода в основу; б – лише в умовах дифузії елементів матеріалу анода в основу

Рисунок 2 – Залежність товщини «білого» шару і дифузійної зони під час ЕІЛ за різних умов

Оскільки температура нагрівання оброблюваної поверхні  $T$  залежить від  $W_p$ , за якої відбувається процес ЕІЛ, то існує прямо пропорційна залежність  $T \sim W_p$ , отже, з підвищенням  $W_p$  збільшуються коефіцієнти дифузії елементів матеріалу анода в основу, а отже, й ефективність процесу ЕІЛ. У зв'язку з цим залежність товщин

«білого шару» і дифузійної зони так само, як і коефіцієнти дифузії, підпорядковуються експоненціальній залежності (відповідно до рівняння Арреніуса).

Розглянутий процес формування шару без масоперенесення матеріалу анода. Прикладом цього може бути цементация, здійснювана методом ЦЕІЛ (ЦЕІЛ), коли у вигляді анода застосовують електрод-інструмент із графіту. Для підвищення якості ЦЕІЛ (збільшення товщини, суцільності та мікротвердості формованого шару) після формування першого шару на цементовану поверхню рекомендується наносити СТС, що містить порошок графіту, а потім проводити ЦЕІЛ цим самим електродом (графітом).

Під час ЦЕІЛ сталевих поверхонь зі збільшенням енергії розряду збільшується товщина цементованого шару, сформованого вдосконаленим методом ЦЕІЛ з використанням СТС ( $h_{цил(СТС)}$ , мкм). Між величинами  $h_{цил(СТС)}$  і зворотною енергією розряду ( $W_p^{-1}$ ) до періоду, коли  $\Delta h_{цил(СТС)} = \Delta h_{цил(СТС)max}$ , існує експоненціальна спадна залежність. Із зростанням енергії розряду товщина цементованого шару збільшується і досягає максимальної величини ( $\Delta h_{цил(СТС)max}$ ). Крім того, збільшення  $h_{цил(СТС)}$  шару зростає тим сильніше, чим більша енергія активації процесу формування цементованого шару ( $E_{цил(СТС)\Delta h}$ ).

Виходячи із залежності  $\Delta h_{цил(СТС)}$  від ( $W_p^{-1}$ ) (спадна експонента), можна зробити висновок, що  $\ln \Delta h_{цил(СТС)}$  пропорційне ( $-W_p^{-1}$ ) і величині  $E_{цил(СТС)\Delta h}$ , тобто

$$\ln \Delta h_{цил(СТС)} \sim (-W_p^{-1}), E_{цил(СТС)\Delta h}, \quad (1)$$

Переходячи від наближеного рівняння до точного, маємо

$$\Delta h_{цил(СТС)} = c_1 \cdot e^{\frac{-E_{цил(СТС)\Delta h}}{W_p}}, \quad (2)$$

де  $c_1 = \Delta h_{цил(СТС)max}$  ( $\Delta h_{cmax}$  – найбільша товщина цементованого шару для даної пари електродів). Тоді

$$\Delta h_{цил(СТС)} = \Delta h_{цил(СТС)max} \cdot e^{\frac{-E_{цил(СТС)\Delta h}}{W_p}}. \quad (3)$$

Залежність (3) – рівняння прогнозування товщини цементованого шару під час ЦЕІЛ.

$E_{цил(СТС)\Delta h}$  – це критична величина, що дорівнює такій енергії розряду, за якої  $\Delta h_{цил(СТС)}$  в  $e$  разів менше від  $\Delta h_{цил(СТС)max}$ . Назвемо її константою прогнозування товщини цементованого шару під час ЦЕІЛ. Розмірність  $[E_{цил(СТС)\Delta h}] = \text{Дж}$ .

Застосовуючи термодинамічний підхід для опису зміни мікротвердості та шорсткості поверхні, одержуємо рівняння прогнозування мікротвердості

$$\Delta H_{\mu_{цил(СТС)}} = \Delta H_{\mu_{цил(СТС)max}} \cdot e^{\frac{-E_{цил(СТС)\Delta H_{\mu}}}{W_p}} \quad (4)$$

та шорсткості

$$\Delta Ra_{циу(СТС)} = \Delta Ra_{циу(СТС)max} \cdot e^{\frac{-E_{циу(СТС)} \Delta Ra}{W_p}} \quad (5)$$

Режим ЕІЛ, необхідний для отримання потрібної товщини та мікротвердості цементованого шару, шорсткості або суцільності поверхневого шару під час ЦЕІЛ, можна визначити відповідно до рівнянь (3), (4) і (5):

$$W_p = \frac{E_{циу(СТС)} \Delta h}{\ln \frac{\Delta h_{циу(СТС)max}}{\Delta h_x}}, \quad W_p = \frac{E_{циу(СТС)} \Delta H_{\mu}}{\ln \frac{\Delta H_{\mu,циу(СТС)max}}{\Delta H_{\mu x}}}, \quad W_p = \frac{E_{циу(СТС)} \Delta Ra}{\ln \frac{\Delta Ra_{циу(СТС)max}}{\Delta Ra_x}} \quad (6)$$

Аналогічний підхід застосовано до випадку формування шару за умов масоперенесення матеріалу анода на прикладі алітування методом ЕІЛ.

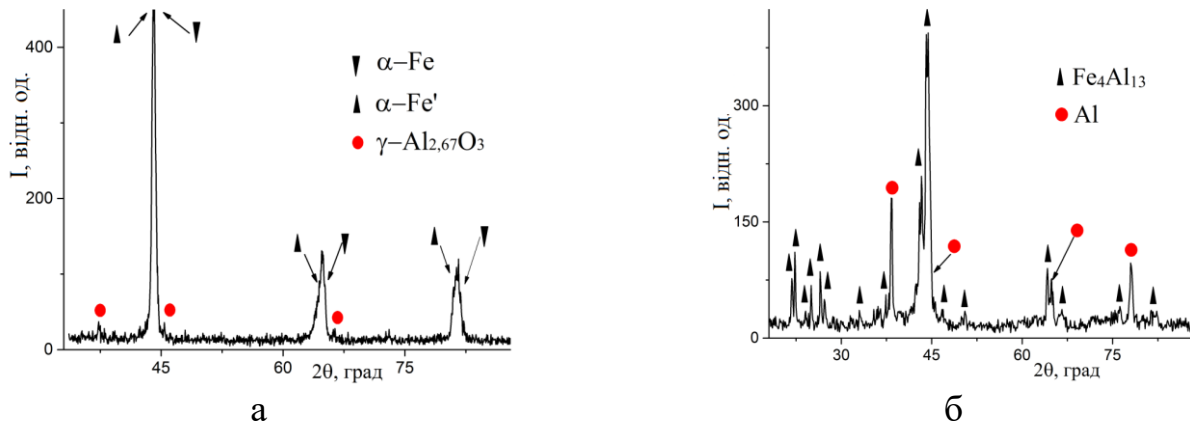
Таким чином, запропонована математична модель прогнозування параметрів якості поверхневого шару. Вона дозволяє за енергетичними параметрами процесу ЕІЛ прогнозувати параметри якості отриманих покриттів, що сформувався за рахунок дифузійних процесів, а також дифузійних процесів і масоперенесення під час ЕІЛ із застосуванням СТС. З'являється можливість достовірно прогнозувати величину енергетичних параметрів ЕІЛ ( $W_p$ ) для одержання необхідних параметрів покриття.

Розглянута фізично обґрунтована математична модель процесу втрати маси оброблюваних поверхонь під час випробувань на жаростійкість, що дозволяє за кількістю теплоти, яка витрачається на нагрівання й витримку за температури випробування, визначити втрати маси поверхні. Запропоноване застосування синергетичних законів опису самоорганізації процесу ЕІЛ на основі вивчення фазових переходів динамічних складових цього процесу за допомогою методу фазової площини і дослідження розв'язку рівняння Ланжевена, що відкриває унікальні можливості контролю архітектури покриттів. Показано, що зі збільшенням енергетичних параметрів процесу ЕІЛ металева поверхня значно нагрівається, дифузійні процеси прискорюються, в покритті утворюються «білі» і/або дифузійні шари, а в поверхневому шарі виникають напруження.

**Четвертий** розділ присвячено експериментальному дослідженню структурно-фазового стану однокомпонентних шарів, отриманих методами ЕІЛ із застосуванням СТС – алітуванням, цементациєю, сульфідкуванням, азотуванням. Показано, що за рахунок використання СТС можна збільшити глибину дифузійного шару, забезпечити зниження мікротвердості поверхні (сульфідкування), зміцнити поверхневий шар (цементация, азотування, алітування), забезпечити підвищення жаростійкості (алітування). Показано, що енергетичні параметри процесу ЕІЛ впливають на якісні параметри отриманих покриттів – змінюються шорсткість, мікротвердість, товщина та суцільність покриття.

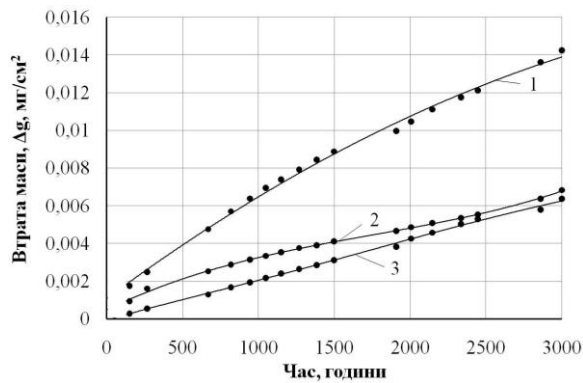
*Алітування (патенти на корисну модель № 119316 UA та № 119707 UA).* Як показали дослідження, структура алітованого покриття складається з трьох ділянок: «білого шару», дифузійної зони та основного металу. Зі збільшенням енергії розряду зростають такі якісні параметри поверхневого шару, як товщина, мікротвердість «білого шару» і перехідної зони, шорсткість. Під час алітування сталей марок 20 і 40 показано, що за енергії розряду  $W_p = 0,52$  Дж формується шар, що складається переважно з  $\alpha$ -Fe та оксидів алюмінію. Зі збільшенням  $W_p$  шар складається з

інтерметалідів заліза та алюмінію, а також вільного алюмінію, що підтверджується даними рентгеноструктурного та локального мікрорентгеноспектрального аналізу (рис. 3).



а –  $W_p = 0,52$  Дж, б –  $W_p = 1,30$  Дж

Рисунок 3 – Дифрактограми з поверхні сталі 20 після ЕІЛ алюмінієм на різних режимах оброблення



1 – без покриття;

2 – алітування методом ЕІЛ;

3 – алітування в розплаві алюмінію

Рисунок 4 – Жаростійкість алітованих покриттів на сталі 20 (випробування на повітрі за температури 980 °С впродовж 50 год)

Порівняльні дослідження жаростійкості алітованих покриттів, отриманих за класичною технологією (в розплаві алюмінію) та ЕІЛ алюмінієвим електродом показали, що електроіскрові покриття характеризуються високою жаростійкістю (рис. 4). Результати дослідження дають можливість рекомендувати технологію ЕІЛ алюмінієвим електродом із використанням СТС для підвищення стійкості сталі до окиснення за підвищених температур.

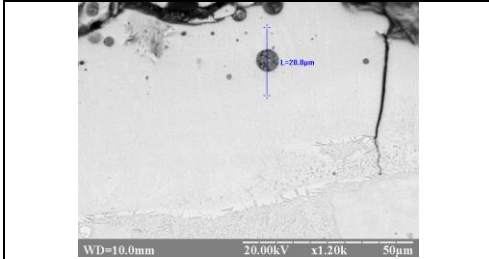
Для практичного застосування можна рекомендувати процес алітування методом ЕІЛ, використовуючи режими (енергію розряду в межах  $W_p = 4,6-6,8$  Дж і продуктивність  $2,0-3,0$  см<sup>2</sup>/хв), що забезпечують формування «білого шару» товщиною 70–130 мкм, мікротвердістю 5000–

7500 МПа, шорсткістю ( $Ra$ ) 6–9 мкм і суцільністю 95–100%. З метою зниження шорсткості поверхневого шару та отримання суцільних покриттів рекомендується проводити ЕІЛ цим самим електродом (алюмінієм), але на менших режимах.

Цементация (патенти на корисну модель № 141992 UA та № 142822 UA). Порівняльний аналіз якісних параметрів шару після традиційної і пропонованої технологій ЦЕІЛ засвідчив, що після оброблення поверхні за пропонованою технологією зменшується шорсткість поверхні. Так, після традиційної ЦЕІЛ за  $W_p = 4,6$  Дж шорсткість поверхні становить  $Ra = 8,3-9,0$  мкм, а після пропонованої –  $Ra = 3,2-4,8$  мкм. Застосування нової технології ЦЕІЛ дозволяє досягти 100 % суцільності легованого шару, мікротвердості зміцненого шару – 9 932 МПа і його товщини – 230 мкм. Досліджено вплив запропонованої технології ЦЕІЛ на кількість вуглецю в цементованому шарі. На поверхні формується шар з умістом вуглецю

до 0,86 %. У приповерхневому шарі покриття формуються невелика кількість ділянок у вигляді пор, у яких міститься графіт (табл. 1). На наш погляд, вільний графіт буде позитивно впливати на антифрикційні властивості оброблених поверхонь під час тертя.

Таблиця 1 – Елементний склад ділянки покриття на сталі 40X



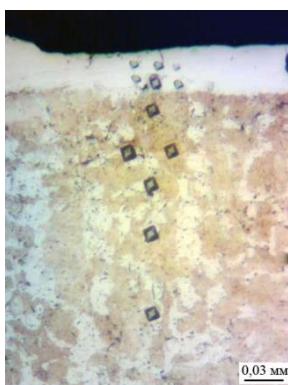
Зображення у відображених електронах, крок сканування 5 мкм,  $W_p = 0,9$  Дж

№	C	Fe	Mn	Si
1	0,76	98,67	0,35	0,22
2	0,74	98,5	0,47	0,29
3	3,55	76,95	18,29	1,22
4	0,82	98,52	0,34	0,32
5	0,72	98,41	0,58	0,29

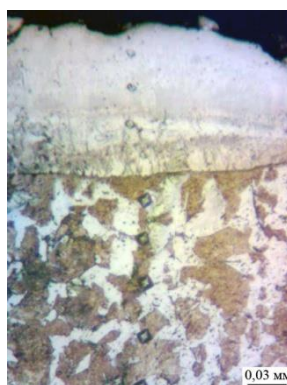
Сульфидування (патенти на корисну модель № 115059 UA, № 117528 UA та № 119317 UA). Дослідження параметрів якості сульфидованого шару, отриманого методом ЕІЛ, дають можливість рекомендувати їх у парах тертя, використовуваних без мастильних матеріалів, для запобігання схоплюванню поверхонь. Отримані сульфитовані покриття товщиною до 75 мкм. Рекомендовано після ЕІЛ застосовувати метод БУФО для зменшення шорсткості поверхні.

Азотування й нітроцементация (патенти на корисну модель № 145506 UA, № 146373 UA). Досліджений новий спосіб азотування та нітроцементации методом ЕІЛ з використанням СТС. Доведено, що отримані шари мають високу твердість (до 9 160 МПа в результаті азотування, до 9 932 МПа в

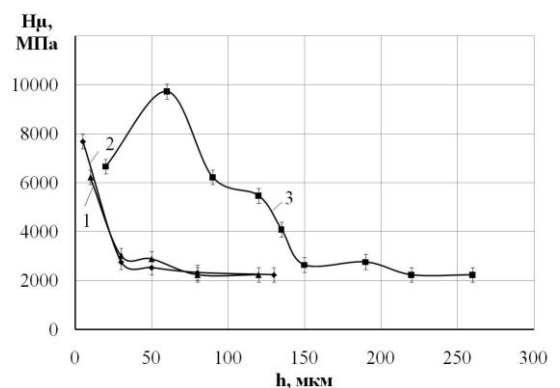
результаті нітроцементации, рис. 5), та товщину шару (до 50 мкм в результаті азотування, до 120 мкм в результаті нітроцементации). Отже, згідно з результатами проведених досліджень покриття, отримані методом ЕІЛ з використанням СТС, забезпечують покращання параметрів якості поверхонь (мікротвердості, товщини, суцільності) порівняно з покриттями, отриманими традиційними методами.



а



б



в

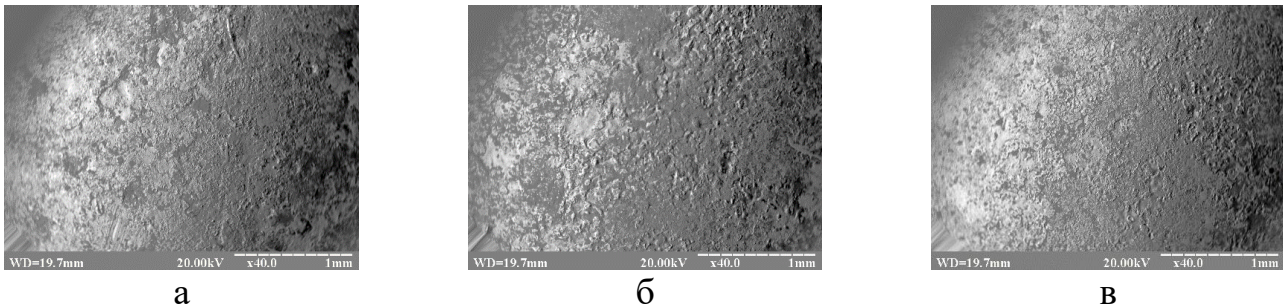
а – 0,52 Дж; б – 3,4 Дж, на графіку 1 – 0,13 Дж; 2 – 0,52 Дж; 3 – 3,4 Дж

Рисунок 5 – Мікроструктура (а, б) і розподіл мікротвердості (в) в поверхневому шарі сталі 40 після нітроцементации методом ЕІЛ

**П'ятий** розділ присвячено експериментальному дослідженню структурно-фазового стану багатокомпонентних покриттів, отриманих методами ЕІЛ з використанням СТС: сульфоцементацияю, сульфоалітуванням, покриттям систем Al-

C-S та Al-C-B, сульфомолібденових і квазі-багатошарових зміцнених покриттів. Виявлено, що комплексні покриття із сіркою складаються з «м'якого» припрацювального й зміцненого шарів.

Сульфоцементация (патенти на винахід № 2663799 RU, на корисну модель № 117867 UA, № 119318 UA). Проведений аналіз якісних параметрів сульфоцементованих покриттів. У результаті аналізу топографії обробленої поверхні встановлений однотипний характер форми отриманих елементів мікронерівностей поверхні (рис. 6). Значне збільшення мікронерівностей на поверхні зразка спостерігається з підвищенням енергії розряду до  $W_p = 3,4$  Дж. Шорсткість поверхні в такому разі становить  $Ra = 2,5$  мкм.



а –  $W_p = 0,13$  Дж; б –  $W_p = 0,27$  Дж; в –  $W_p = 0,52$  Дж

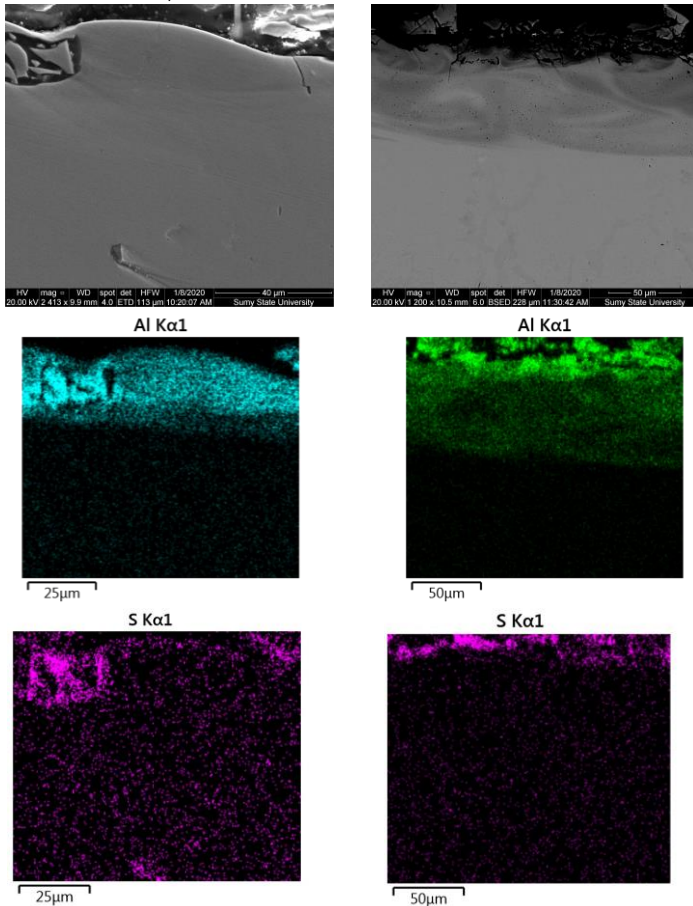
Рисунок 6 – Топографія ділянок поверхні сталі 40 після сульфоцементации

За допомогою металографічного і дюрOMETричного аналізів зразків виявлено, що оброблена поверхня складається з шарів: «м'якого», зміцненого й основного металу. Результати мікрорентгеноспектрального аналізу свідчать про те, що в результаті сульфоцементации методом ЕІЛ поверхневі шари на глибині 10–40 мкм залежно від енергетичних параметрів процесу насичені сіркою. Ця зона – шар зниженої мікротвердості. Нижче, під цим шаром, формується зміцнений шар, що характеризується підвищеним вмістом вуглецю та високою мікротвердістю. Товщина зміцненого шару так само залежить від енергетичних параметрів ЕІЛ й становить 15–40 мкм.

На мікроструктурах сталі 20 можна виділити три зони: приповерхневий несущий пухкий шар товщиною 10–100 мкм і мікротвердістю 1 368–2 073 МПа, «білий» зміцнений шар товщиною 20–40 мкм та мікротвердістю 4 094–5 157 МПа, дифузійна зона й основний метал із феритоперлітною структурою. Зі зростанням енергії розряду збільшуються параметри шару: товщина, мікротвердість верхнього та «білого» шарів, а також їх суцільність. У результаті заміни матеріалу підкладки на сталь 40 підвищується як мікротвердість верхнього шару (1 670 і 2 240 МПа за енергій розряду 0,13 та 3,4 Дж відповідно), так і зміцненого шару (5 147 та 10 380 МПа за енергій розряду 0,13 і 3,4 Дж відповідно).

Сульфоалітування (патенти на винахід № 121343 UA та № 2696616 RU, корисну модель № 130157 UA). Металографічний і дюрOMETричний аналізи отриманих покриттів на сталі 20 свідчать про те, що в покритті можна виділити три зони: приповерхневий несущий пухкий шар товщиною 10–100 мкм та мікротвердістю 1 368–2 073 МПа, «білий» зміцнений шар товщиною 20–40 мкм і мікротвердістю 4 094–5 157 МПа, дифузійну зону й основний метал із феритоперлітною структурою. У результаті заміни матеріалу підкладки (основи) на сталь 40 збільшується твердість верхнього та зміцненого шарів. Локальний

мікрорентгено-спектральний аналіз засвідчив, що найбільша кількість сірки міститься в поверхневому шарі, що характеризує шар зниженої мікротвердості й розподіляється на глибині до 10 мкм (рис. 7). Дифузійна зона алюмінію становить 30–80 мкм залежно від енергетичних параметрів процесу ЕІЛ. Найбільший вміст алюмінію характерний для ділянок покриття на відстані 7–15 мкм від поверхні. Приповерхневий «м'який» шар збагачений сіркою, зміцнений – алюмінієм.

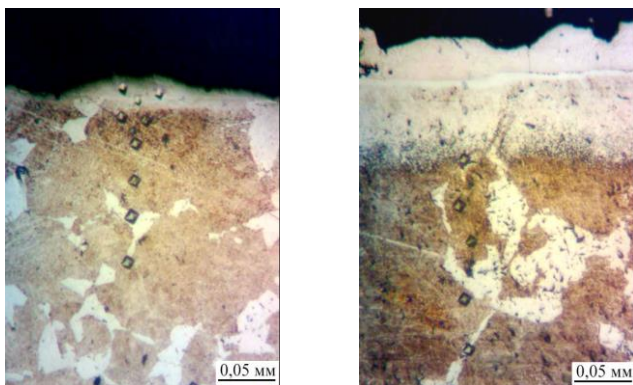


а

б

а –  $W_p = 0,13$  Дж; б –  $W_p = 3,4$  Дж;

Рисунок 7– Карти розподілу хімічних елементів в S-Al-покритті на сталі 40 після ЕІЛ за різної енергії розряду



а

б

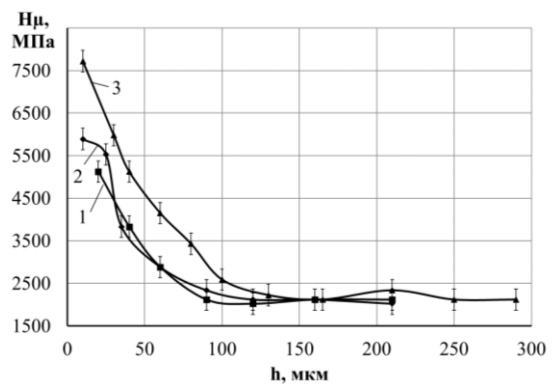
а –  $W_p = 0,13$  Дж; б –  $W_p = 0,52$  Дж; в –  $W_p = 4,9$  Дж;г – на графіку 1 –  $W_p = 0,13$  Дж, 2 –  $W_p = 0,52$  Дж, 3 –  $W_p = 4,9$  Дж

Рисунок 8 – Мікроструктури (а, б) і розподіл мікротвердості (в) Al+C+S-покриттів на сталі 38X2MЮA

Згідно з результатами рентгенографічних досліджень за всіх досліджуваних енергій розряду в поверхневому шарі утворюється інтерметалід FeAl, зі збільшенням енергії розряду – інтерметалід FeAl<sub>2</sub>. Крім того, у сталі 20 виявлено твердий розчин ОЦК, а в сталі 40 за енергій розряду  $W_p = 0,13$  Дж і  $W_p = 0,55$  Дж – твердий розчин ГЦК, а за  $W_p = 3,4$  Дж – твердий розчин ОЦК.

Al+C+S-покриття (патенти на винахід № 121346 UA та № 2707776 RU, корисну модель № 130866 UA). Вивчено вплив режимів ЕІЛ на параметри якості Al-C-S-покриттів. На сталі 38X2MЮA доведено, що за  $W_p = 0,13$  Дж і  $W_p = 4,9$  Дж товщина «білого шару» становить 10 і 70 мкм,  $H_{\mu} = 5\ 126$  МПа та  $H_{\mu} = 7\ 721$  МПа (рис. 8), суцільність 60 % і 100 % відповідно.

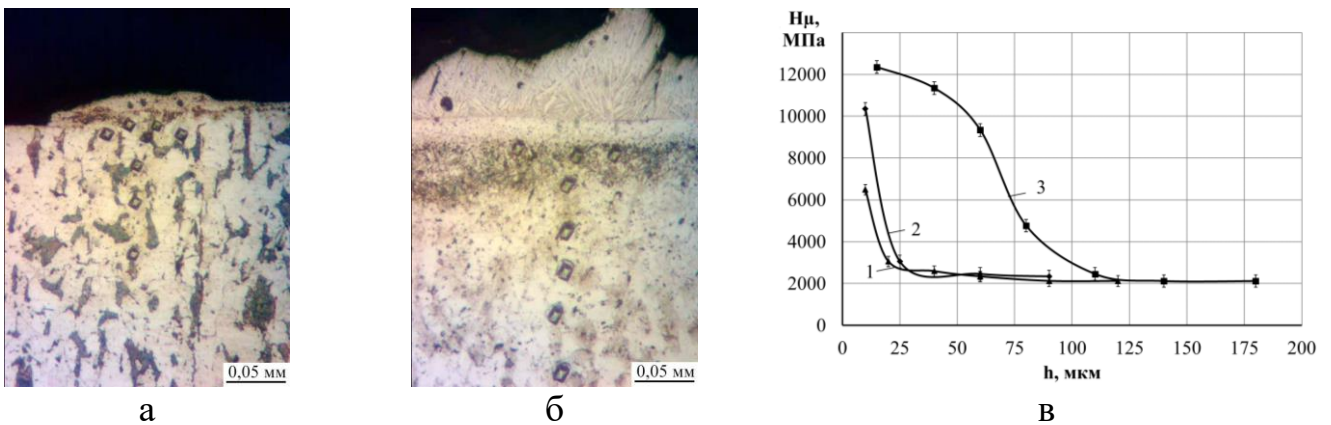
Мікрорентгено-спектральний аналіз засвідчив, що вміст сірки на поверхні максимальний і різко зменшується вглиб металу.



в



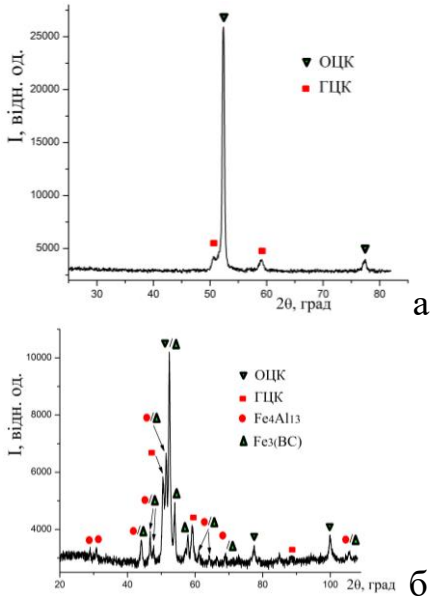
*Al+C+V-покриття.* Згідно з результатами мікроструктурного аналізу на сталі 40 поверхневий шар складається з декількох ділянок, кількість та параметри яких обумовлені енергетичними режимами процесу ЕІЛ (рис. 9). За енергій розряду 0,13 і 0,55 Дж шари складаються з трьох ділянок: верхнього «білого» зміцненого шару, дифузійної зони й основного металу – сталі 40 із феритоперлітною структурою. Водночас, величина «білого шару» для цих режимів становить 15–20 мкм. Збільшення енергії розряду до 4,9 Дж приводить до зміни кількості ділянок і їх структури: верхнього шару з дендритною структурою (до 60 мкм), прошарку (до 20 мкм), дифузійної зони, що характеризується подрібненими структурними складовими й у результаті цього має підвищену травильність у реактиві, а також основного металу.



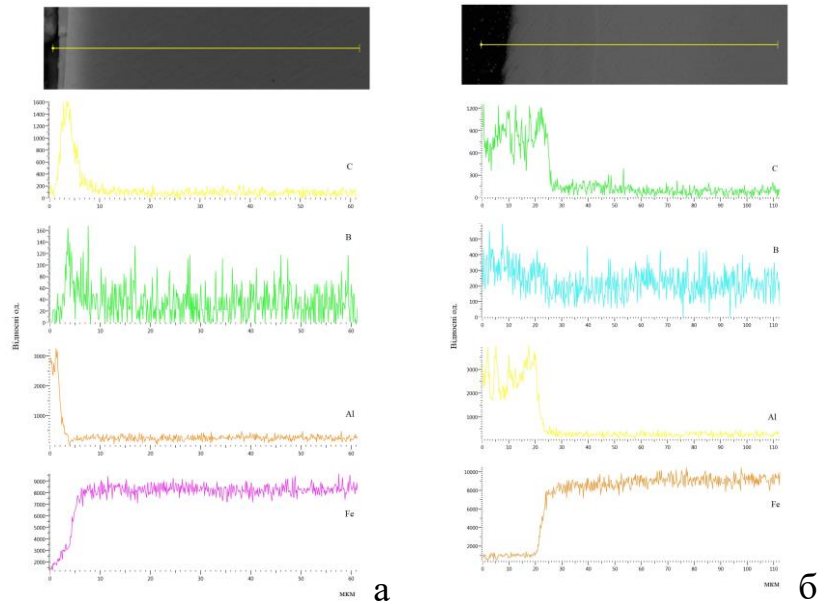
а –  $W_p = 0,55$  Дж; б –  $W_p = 4,9$  Дж;  
 в – на графіку 1 –  $W_p = 0,13$  Дж; 2 –  $W_p = 0,55$  Дж; 3 –  $W_p = 4,9$  Дж  
 Рисунок 9 – Мікроструктури (а–б) і розподіл мікротвердості (в)  
 Al-C-V-покриттів на сталі 40

За енергій розряду 0,13 та 0,55 Дж фазовий склад покриттів представлений твердими розчинами ОЦК і ГЦК з параметрами  $a = 28,651$  та  $36,189$  нм відповідно. Покриття, отримані за  $W_p = 4,9$  Дж, характеризуються наявністю, крім твердих розчинів ОЦК і ГЦК зі збільшеними параметрами кристалічної ґратки, інтерметалідів  $Fe_4Al_{13}$  та легованого цементиту  $Fe_3(CV)$  (рис. 10). Утворення цих фаз сприяє значному зміцненню й збільшенню мікротвердості поверхнього шару до 12 350 МПа. Мікрорентгеноспектральний аналіз отриманих покриттів свідчить про те, що під час електроіскрового легування поверхні шари насичуються алюмінієм, бором і вуглецем. З підвищенням енергії розряду дифузійна зона Al, C та V збільшується: за  $W_p = 0,13$  Дж вона становить 5–7 мкм, тоді як за  $W_p = 4,9$  Дж – 23–25 мкм (рис. 11). Здебільшого вглиб від поверхні дифундують вуглець та алюміній.

*Mo+S-покриття (патент України на корисну модель № 144932 UA).* Досліджено процес сульфомолібденування металевих поверхонь з використанням СТС під час ЕІЛ. Металографічні й дюрOMETричні дослідження показали, що сульфомолібденові покриття складаються з чотирьох зон: верхнього пухкого шару з мікротвердістю  $H\mu = 1\ 112$ – $2\ 040$  МПа, «білого» зміцненого шару з  $H\mu = 5\ 147$ – $5\ 474$  МПа для  $W_p = 0,13$  Дж і  $H\mu = 10\ 596$ – $10\ 731$  МПа для  $W_p = 3,4$  Дж, дифузійної зони й основного металу.

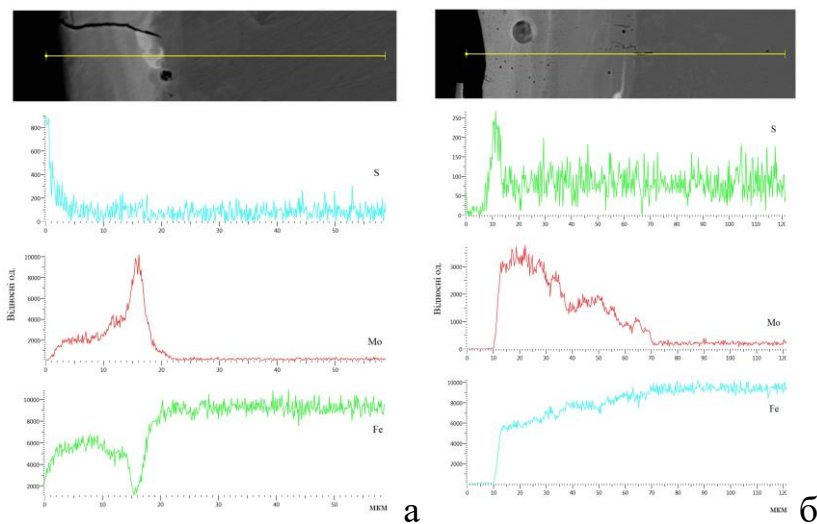


а –  $W_p = 0,55$  Дж; б –  $W_p = 4,9$  Дж  
Рисунок 10 – Дифрактограми Al-C-B-покриттів на сталі 40

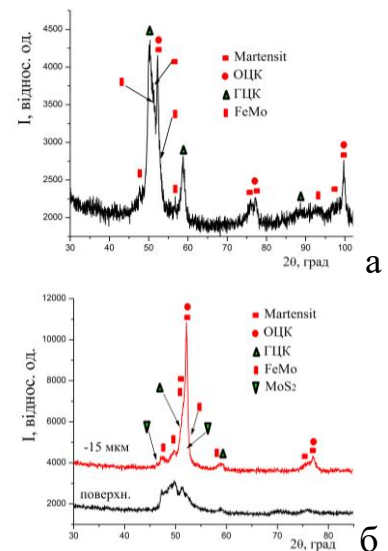


а –  $W_p = 0,13$  Дж; б –  $W_p = 4,9$  Дж  
Рисунок 11 – Розподіл елементів у Al-C-B-покриттях

Згідно з результатами енергодисперсійного аналізу сірка та молібден концентруються на глибині до 15 і 70 мкм за  $W_p = 3,4$  Дж відповідно (рис. 11). Рентгеноструктурний аналіз S-Mo-покриттів свідчить про те, що у покритті сталі 20 дисульфід молібдену утворюється вже за енергії розряду  $W_p = 0,55$  Дж (3,77 %), а за  $W_p = 3,4$  Дж його близько 8 % на поверхні й близько 5 % на глибині до 15 мкм (рис. 12).



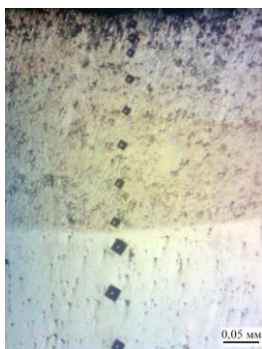
а –  $W_p = 0,13$  Дж; б –  $W_p = 3,4$  Дж  
Рисунок 11 – Розподіл елементів у сульфомолібденових покриттях сталі 40



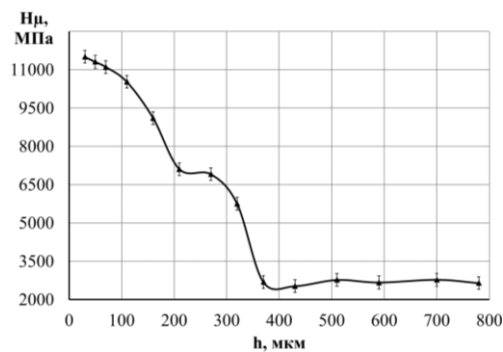
а –  $W_p = 0,55$  Дж; б –  $W_p = 3,4$  Дж  
Рисунок 12 – Дифрактограми сульфомолібденових покриттів, отриманих методом ЕЛІ, на сталі 40

*Комбіновані С-Al-Ti5K6-покриття (патент на корисну модель № 142338 UA).* Наведений аналіз закономірностей формування багат шарових покриттів у результаті електроіскрового легування в умовах чергування легувальних електродів

для послідовного нанесення на підкладку зі сталі 12X18H10T. Апробовані схеми: цементація електроіскровим легуванням (ЦЕІЛ) за  $W_p = 3,4$  Дж + алітування алюмінієвим електродом марки СВА99 за  $W_p = 3,4$  Дж; ЦЕІЛ за  $W_p = 3,4$  Дж + ЕІЛ твердим сплавом Т15К6 за  $W_p = 3,4$  Дж; ЦЕІЛ за  $W_p = 3,4$  Дж + алітування алюмінієвим електродом марки СВА99 за  $W_p = 3,4$  Дж + ЕІЛ твердим сплавом Т15К6 за  $W_p = 3,4$  Дж. Покриття, сформовані в послідовності ЦЕІЛ → ЕІЛ Al → ЕІЛ Т15К6, мають найбільшу зону підвищеної твердості (320–360 мкм) і найменшу шорсткість поверхні (7,5 мкм) (рис. 13). Завдяки утворенню 62 % (мас.) TiC та інтерметалідів забезпечується максимальна мікротвердість поверхневого шару (більша ніж 11 500 МПа) (рис. 14). ЕІЛ за описаною технологією дозволяє збільшити дифузійну зону вуглецю й алюмінію, підвищити твердість і товщину зміцненого шару.



а



б

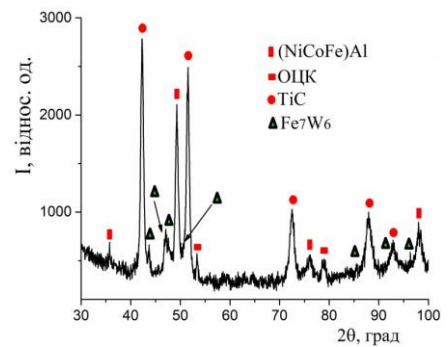


Рисунок 13 – Мікроструктура (а) і розподіл мікротвердості (б) поперечного перерізу зразка зі сталі 12X18H10T після ЦЕІЛ, ЕІЛ алюмінієм та ЕІЛ твердим сплавом Т15К6

Рисунок 14 – Дифрактограми поверхні сталі 12X18H10T після ЦЕІЛ, ЕІЛ алюмінієм і твердим сплавом Т15К6

**Шостий розділ** присвячений промислового впровадженню технологій підвищення якості деталей динамічного обладнання методами, що базуються на ЕІЛ з використанням СТС.

Результати механічних випробувань зразків із покриттями, отриманими методом ЕІЛ з використанням СТС показали, що формування покриттів на підкладках зі сталі 20, 40, 38X2МЮА, 12X18H10T, 30X13 супроводжується зниженням меж міцності й текучості відповідно на  $\sim 5$  і  $\sim 4$  %. Водночас характеристики пластичності (відносне подовження та відносне звуження) зростають. Застосування методу БУФО як завершальної операції після ЕІЛ підвищує характеристики міцності для сталі 20 на 10–15 %, 40 і 38X2МЮА – на 12–18 %, сталей 12X18H10T та 30X13 – на 7 і 10 % відповідно.

Проведені порівняльні триботехнічні випробування покриттів, отриманих методом ЕІЛ з використанням СТС, показали, що високу зносостійкість мають покриття систем Al + C + B (лінійне зношування  $\Delta l = 1,1$  мкм на сталі 40), N + C ( $\Delta l = 1,2$  мкм на сталі 20), Mo + S ( $\Delta l = 1,3$  мкм на сталі 40). Згідно з результатами триботехнічних випробувань покриттів сірка забезпечує підвищення зносостійкості. Зокрема, на сталі 40 лінійне зношування зразків з алітованим покриттям становить  $\Delta l = 2,5$  мкм, а із сульфоалітованим –  $\Delta l = 1,8$  мкм.

Використання як підкладки легованої сталі знижує лінійне зношування. Доведено, що всі досліджені покриття, отримані методом ЕІЛ з використанням СТС,

забезпечують підвищення зносостійкості сталі 38Х2МЮА й 12Х18Н10Т. Порівняльні випробування покриттів, отриманих методом ХТО (карбонітрацією), іонним азотуванням і ЕІЛ з використанням СТС, на сталі 38Х2МЮА показали, що за зносостійкістю карбонітридні покриття, отримані методом ЕІЛ з використанням СТС не поступаються отриманим у солях дифузійним способом. Крім того, Al-C-S-покриття зменшують лінійне зношування сталі в 1,5 рази порівняно зі станом без покриття. Згідно з результатами випробування покриттів, отриманих різними способами, на сталі 12Х18Н10Т тверді й зносостійкі покриття С-Al-T15K6 і N-C, синтезовані за пропонованими технологіями, що базуються на методі ЕІЛ, забезпечують лінійне зношування 1,1 та 1,2 мкм відповідно.

Виявлені залежності характеристик якості поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ з використанням СТС у результаті синтезу однокомпонентних і багатокомпонентних покриттів від технологічних параметрів процесу, що дозволяє розробити загальні підходи до вибору технології керування якістю цих покриттів та формування структури для подальшого технологічного впливу. На підставі експериментальних досліджень запропоновані математичні моделі (рівняння (3), (4) та (5): товщини  $h$ , мікротвердості  $H_{\mu}$ , шорсткості  $Ra$  відповідно й суцільності поверхневого шару  $S$ ), що дають можливість за енергетичними параметрами визначати основні показники якості сформованого шару: приріст, мікротвердість, шорсткість і суцільність, а отже, установлювати алгоритм подальшого технологічного впливу для забезпечення необхідної якості. У таблицях 2–3 подані зведені дані констант рівнянь (1)–(5) для процесів алітування й цементації методом ЕІЛ з використанням СТС. Розраховані константи рівнянь для процесів отримання багатокомпонентних покриттів, наприклад нітроцементації (табл. 4).

Таблиця 2 – Зведені дані констант рівнянь прогнозування показників якості алітованих поверхонь

Основа	$E_{a\Delta h}$ , Дж	$\Delta h_{a\max}$ , мкм	$E_{a\Delta H_{\mu}}$ , Дж	$\Delta H_{\mu a\max}$ , МПа	$E_{a\Delta Ra}$ , Дж	$\Delta Ra_{a\max}$ , мкм	$E_{a\Delta S}$ , Дж	$\Delta S_{a\max}$ , %
Сталь 20	0,964	73,6	0,661	6 921,58	1,00	8,08	0,285	100
Сталь 40	1,006	102,7	0,627	7 906,97	1,06	7,92	0,373	100

Таблиця 3 – Зведені дані констант рівнянь прогнозування показників якості цементованих поверхонь

Основа	$E_{c\Delta h}$ , Дж	$\Delta h_{c\max}$ , мкм	$E_{c\Delta H_{\mu}}$ , Дж	$\Delta H_{\mu c\max}$ , МПа	$E_{c\Delta Ra}$ , Дж	$\Delta Ra_{c\max}$ , мкм
Сталь 20	1,131	211	0,093	11114	1,551	4,95
Сталь 40	1,087	235	0,045	11968	1,519	4,61

Таблиця 4 – Зведені дані констант рівнянь прогнозування показників якості нітроцементованих поверхонь

Підкладка	$E_{p\Delta h}$ , Дж	$\Delta h_{p\max}$ , мкм	$E_{p\Delta H_{\mu}}$ , Дж	$\Delta H_{\mu p\max}$ , МПа	$E_{p\Delta Ra}$ , Дж	$\Delta Ra_{p\max}$ , мкм	$E_{p\Delta S}$ , Дж	$\Delta S_{p\max}$ , %
Сталь 20	0,221	108	0,061	9882	0,225	4,94	0,014	100
Сталь 40	0,189	125	0,045	10060	0,227	4,37	0,030	100

Розроблена методика дозволяє встановлювати критерії оцінювання альтернативних варіантів способів оброблення методом ЕІЛ з використанням СТС

поверхневих шарів необхідної якості й вибору найбільш раціонального. Визначені константи рівнянь якості поверхневих шарів після однокомпонентного (алітування, цементації, азотування) та багатокомпонентного (сульфоцементації, сульфоалітування, Al-C-B-покриття, сульфомолібденування, нітроцементації) насичення методом ЕІЛ з використанням СТС. Зазначений метод дозволяє прогнозувати показники якості покриття за відомими енергетичними режимами й, навпаки, для отримання заданих показників якості визначати енергетичні режими ЕІЛ.

Проведений статистичний аналіз процесу конденсації речовини під час ЕІЛ з використанням СТС, способом побудови фазових портретів. Досліджено процес формування електроіскрових покриттів за різного часу релаксаційної концентрації речовини, внутрішнього напруження та температури (сталеві підкладка). Проведений аналіз дозволяє описати експериментальні дані, згідно з результатами яких з підвищенням потужності розряду збільшуються товщина й мікротвердість зон покриття. Зі зростанням енергетичних параметрів процесу ЕІЛ металеві поверхні значно нагріваються, дифузійні процеси прискорюються, у покритті утворюються «білі» та дифузійні шари, а в поверхневому шарі виникають напруження. Статистичний аналіз процесу модифікації поверхні методом ЕІЛ дає унікальну можливість контролю архітектури покриттів. Результати експериментів підтверджені даними статистичного аналізу.

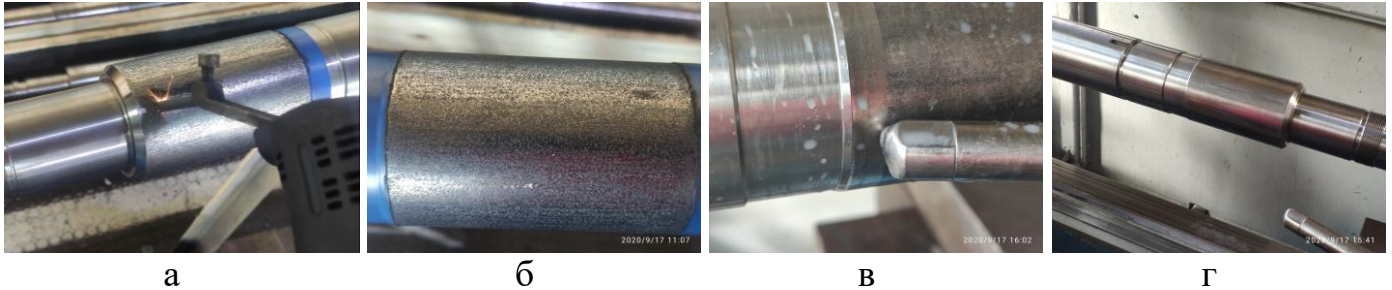
Розроблені нові технологічні процеси зміцнення й відновлення деталей динамічного обладнання. У таблиці 5 подані зведені дані впровадження нових способів підвищення працездатності деталей машин.

Таблиця 5 – Зведені дані впровадження нових способів зміцнення та відновлення деталей ДО

Деталь	Матеріали та режими ЕІЛ	Якісні параметри шару після ЕІЛ	Упровадження
1	2	3	4
 Вал насоса HDO-11st. Flowserve	<b>ЦЕІЛ</b> СТС: графіт + вазелін; анод – графіт; катод – сталь 14462 ASTM A276 (сталь 03X22H5AM2). $W_p = 4,6$ Дж	$H\mu = 11\ 823\text{--}7659$ МПа, $h = 130\text{--}240$ мкм, $Ra = 0,8$ мкм і $1,6$ мкм (після БУФО)	АТ «Сумський завод насосного та енергетичного машинобудування «НАСОСЕНЕРГОМАШ», ТОВ «ТРІЗ» (м. Суми)
 Колінчастий вал поршневого компресора ВШ-3/40	<b>КЕП С-Al-T15K6</b> катод – сталь 40X; анод – алюмінієвий електрод марки СвА99, графітовий електрод-інструмент МПГ-7, твердий сплав Т15К6. $W_p = 3,4$ Дж.	$H\mu = 10\ 100$ МПа, $h = 100$ мкм, $Ra = 1,2$ мкм (після БУФО)	ТОВ «ТРІЗ», КП «Міськводоканал» (м. Суми)

1	2	3	4
 <p>Статорні втулки насоса 301-Д</p>	<p><b>КЕШ Al + C + V</b> СТС: вазелін, алюмінієва пудра, порошок аморфного бору; катод – 08X17H13M2T; анод – графіт. <math>W_p = 4,6</math> Дж</p>	<p><math>H\mu = 12\ 350</math> МПа, <math>h = 60</math> мкм, <math>Ra = 0,8</math> мкм (після БУФО)</p>	<p>ТОВ «ТРІЗ», АТ «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання – ІНЖИНІРИНГ» (м. Суми)</p>
 <p>Втулки масляних ущільнень відцентрового компресора</p>	<p><b>КЕШ C + N</b> СТС: сечовина, жовта кров'яна сіль, вазелін; катод – 12X18H10T; анод – графіт. <math>W_p = 3,4</math> Дж</p>	<p><math>H\mu = 10\ 080</math> МПа, <math>h = 100</math> мкм, <math>Ra = 0,8</math> мкм (після БУФО)</p>	<p>ТОВ «ТРІЗ»; АТ «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання – ІНЖИНІРИНГ» (м. Суми)</p>
 <p>Робоче колесо відцентрового компресора</p>	<p><b>КЕШ C-Al-T15K6</b> катод – сталь 12X18H10T; анод – Al, графіт, T15K6. <math>W_p = 3,4</math> Дж</p>	<p><math>H\mu = 11\ 000</math> МПа, <math>h = 340</math> мкм, <math>Ra = 1,2</math> мкм</p>	<p>ТОВ «ТРІЗ», «ПАТ «СУМИХІМПРОМ» (м. Суми)</p>
 <p>Вал-шестерня компресорної установки К-104 «ВАВЕТТА»</p>	<p><b>1 – ЦЕЛІ</b> СТС: графіт, вазелін; анод – графіт; катод – сталь 36X2H2MФА. <math>W_p = 4,6</math> Дж. <b>2 – КЕШ Al-C-S</b> СТС: сірчана мазь, алюмінієва пудра, вазелін; анод – графіт; катод – сталь 36X2H2MФА. <math>W_p = 3,4</math> Дж</p>	<p>1 – <math>H\mu = 11\ 823</math>– 7 659 МПа, <math>H = 130</math>–<math>240</math> мкм, <math>Ra = 0,8</math> мкм (після БУФО). 2 – <math>H\mu = 7\ 580</math>– 7 650 МПа, <math>h = 60</math>–<math>70</math> мкм, <math>Ra = 0,8</math> мкм (після БУФО)</p>	<p>ТОВ «ТРІЗ», КП «Міськводоканал» (м. Суми)</p>
 <p>Прес-форма для формування виробів з композиційних матеріалів</p>	<p><b>КЕШ Mo-S</b> СТС: сірчана мазь із додаванням колоїдної сірки, вазелін; анод – стрижень із молібдену; катод – сталь У10А. <math>W_p = 3,4</math> Дж</p>	<p><math>H\mu = 11\ 220</math> МПа, <math>h = 70</math> мкм, <math>Ra = 0,5</math> (після ДВ)</p>	<p>ТОВ НВП СУМИПЛАСТПОЛІМЕР (м. Суми)</p>

Наприклад, запропонований спосіб підвищення зносостійкості шийок валів під підшипники ковзання на прикладі насоса HDO-11st. Flowserve зі сталі 14462 ASTM A276, що полягає у цементації методом ЕІЛ з використанням СТС із подальшим БУФО (рис. 15). Показано, що після оброблення отриманий шар із  $H_{\mu} = 11\,823\text{--}7\,659$  МПа і  $h = 130\text{--}240$  мкм. Безабразивне ультразвукове фінішне оброблення після ЕІЛ забезпечує зниження шорсткості  $Ra$  до 0,8 та 1,6 мкм, що відповідає вимогам.



а – ЦЕІЛ; б – поверхня після ЦЕІЛ; в – БУФО після ЦЕІЛ;  
г – деталь після зміцнення

Рисунок 15 – Фотографії етапів технологічного процесу зміцнення деталі «вал» насоса HDO-11st. Flowserve

Розроблені технології ЕІЛ з використанням СТС упроваджені в ТОВ «ТРИЗ» м. Сум, АТ «Сумський завод насосного та енергетичного машинобудування «НАСОСЕНЕРГОМАШ», АТ «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання – ІНЖИНІРИНГ», ПАТ «СУМИХІМПРОМ», КП «Міськводоканал», ТОВ НВП «СУМИПЛАСТПОЛІМЕР».

Загальний економічний ефект від упровадження технології ЕІЛ з використанням СТС на різних підприємствах становить 1 млн 171 тис. грн.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведені нові науково обґрунтовані теоретичні й експериментальні результати, що узагальнюють і забезпечують вирішення актуальної науково-технічної проблеми – підвищення довговічності деталей динамічного обладнання способом керування структурою та властивостями сталених поверхонь завдяки комплексному впливу на основі електроіскрового легування. У результаті виконаної роботи одержані такі основні результати.

1. Аналіз літературних публікацій, патентів, присвячений виявленню тенденцій підвищення якості робочих поверхонь деталей динамічного обладнання засвідчив, що найбільш перспективним напрямком є створення на робочих поверхнях деталей захисних покриттів. Під час вибору методу модифікації поверхні або комбінації з декількох методів необхідно віддавати перевагу економічно вигідним й екологічно безпечним. ЕІЛ широко використовують для цементації, металізації, нанесення твердих зносостійких і м'яких антифрикційних сплавів на поверхню. Доведено, що насичення поверхні одним або одночасно кількома елементами методами ЕІЛ з використанням спеціального технологічного середовища, наношеного на оброблювану поверхню, з подальшим ЕІЛ дозволяє забезпечити комплекс властивостей з отриманням покриттів високої якості.

2. На підставі виконаних досліджень розроблена методологія керування структурним станом сталюї поверхні після оброблення методом ЕІЛ, що дає можливість оцінити вплив структурно-фазового складу матеріалу покриття на його властивості. Узагальнені закономірності впливу чинників (складу електродних матеріалів та СТС, енергетичних і технологічних параметрів оброблення методом ЕІЛ) на структурний стан обробленої поверхні. Їх урахування дозволяє обґрунтовано пропонувати матеріали й склад СТС для забезпечення необхідних властивостей поверхні найбільш економічним способом.

3. Проведений аналіз особливостей структуро- та фазоутворення однокомпонентних шарів, отриманих методом ЕІЛ з використанням СТС: алітуванням, цементациєю, сульфідкуванням, азотуванням. Доведено, що завдяки використанню СТС можна збільшити глибину дифузійного шару, знизити мікротвердість поверхні (сульфідкуванням), зміцнити поверхневий шар (цементациєю, азотуванням, алітуванням), підвищити жаростійкість (алітуванням). Згідно з результатами, енергетичні параметри процесу ЕІЛ впливають на параметри якості отриманих покриттів: змінюють їх шорсткість, мікротвердість, товщину й суцільність. Під час алітування сталей марок 20 і 40 виявлено, що за низьких енергій розряду ( $W_p = 0,52$  Дж) формується шар, що складається переважно з  $\alpha$ -Fe та оксидів алюмінію. У результаті збільшення  $W_p$  шар складається з інтерметалідів заліза й алюмінію, а також вільного алюмінію, що підтверджено даними рентгеноструктурного та локального мікрорентгеноспектрального аналізів. За пропонуванним способом ЦЕІЛ з використанням СТС вдалося збільшити зміцнений шар до 230 мкм і досягти твердості до 10 796 МПа за 100 % суцільності легованого шару. Отримані сульфідні покриття товщиною до 75 мкм. Після сульфідкування з енергією розряду  $W_p > 0,55$  Дж для зменшення шорсткості поверхні рекомендовано застосовувати метод БУФО. Досліджений новий спосіб азотування методом ЕІЛ з використанням СТС. Доведено, що отримані шари мають високу мікротвердість (до 9 160 МПа) і товщину шару (до 50 мкм).

4. Проведений аналіз особливостей структуро- й фазоутворення багатокомпонентних шарів, отриманих методами ЕІЛ з використанням СТС: сульфоцементациєю, сульфоалітуванням, покриттям систем Al-C-S та Al-C-B, сульфомолібденуванням і створенням квазібагатошарових покриттів. Виявлено, що комплексні покриття із сіркою складаються з «м'якого» припрацювального й зміцненого шарів. Із підвищенням енергії розряду збільшуються товщина, мікротвердість і суцільність покриттів. Згідно з результатами локального мікрорентгеноспектрального аналізу наявність у СТС сірки сприяє процесу сульфідкування, бору – борування, алюмінію – алітування. Рентгенографічні дослідження показали, що в сульфоалітованих покриттях за всіх досліджуваних енергій розряду в поверхневому шарі утворюється інтерметалід FeAl, зі збільшенням енергії розряду – інтерметалід FeAl<sub>2</sub>. Завдяки введенню аморфного бору в СТС вдалося збільшити твердість покриття до 12 350 МПа на сталі 40 за  $W_p = 4,9$  Дж. Результати рентгеноструктурного аналізу Al-C-B-покриттів свідчать про те, що за енергій розряду 0,13 і 0,55 Дж фазовий склад покриттів представлений твердими розчинами ОЦК і ГЦК, а покриття, отримані за  $W_p = 4,9$  Дж, характеризуються наявністю, крім твердих розчинів ОЦК та ГЦК зі збільшеними параметрами кристалічної ґратки, інтерметалідів Fe<sub>4</sub>Al<sub>13</sub> і легованого цементиту



Fe<sub>3</sub>(СВ). Утворення цих фаз сприяє значному зміцненню й підвищенню мікротвердості поверхневого шару. Металографічні та дюрOMETричні дослідження показали, що сульфомолібденові покриття складаються з чотирьох зон: верхнього пухкого шару з мікротвердістю  $H\mu = 1\ 112\text{--}2\ 040$  МПа, «білого» зміцненого шару з  $H\mu = 5\ 147\text{--}5\ 474$  МПа для  $W_p = 0,13$  Дж і  $H\mu = 10\ 596\text{--}10\ 731$  МПа для  $W_p = 3,4$  Дж, дифузійної зони й основного металу. Згідно з результатами енергодисперсійного аналізу сірка та молібден концентруються на глибині до 15 і 70 мкм за  $W_p = 3,4$  Дж відповідно. Рентгеноструктурний аналіз отриманих покриттів свідчить про те, що в покритті сталі 20 дисульфід молібдену утворюється вже за енергії розряду  $W_p = 0,55$  Дж (3,77 %), а за  $W_p = 3,4$  Дж його близько 8 % на поверхні й близько 5 % на глибині до 15 мкм.

Поданий аналіз закономірностей формування багат шарових покриттів під час ЕІЛ сталі 12Х18Н10Т. Покриття, сформовані в послідовності ЦЕІЛ → ЕІЛ А1 → → ЕІЛ Т15К6, мають найбільшу зону підвищеної твердості (320–360 мкм) і найменшу шорсткість поверхні (7,5 мкм). Завдяки утворенню 62 % (мас.) ТіС та інтерметалідів забезпечується максимальна мікротвердість поверхневого шару (більша ніж 11 500 МПа). ЕІЛ за описаною технологією дозволяє збільшити дифузійну зону вуглецю й алюмінію, підвищити твердість і товщину зміцненого шару.

5. На підставі експериментальних досліджень запропоновані математичні моделі (рівняння товщини, мікротвердості, шорсткості й суцільності поверхневого шару), що дають можливість прогнозувати за енергетичними параметрами основні показники якості сформованого шару: приріст, мікротвердість, шорсткість і суцільність, а отже, установлювати структуру подальшого технологічного впливу для забезпечення необхідної якості.

6. Проведений статистичний та кінетичний аналізи процесу конденсації речовини під час ЕІЛ з використанням СТС способом побудови фазових портретів. Досліджено процес формування електроіскрових покриттів за різного часу релаксаційної концентрації речовини, внутрішнього напруження й температури (сталеві підкладки). Проведений аналіз дозволяє описати експериментальні дані, згідно з результатами яких із підвищенням потужності розряду збільшуються товщина та мікротвердість зон покриття.

7. Проведені порівняльні триботехнічні випробування покриттів, отриманих методом ЕІЛ із застосуванням СТС. Доведено, що сірка в покритті забезпечує підвищення зносостійкості. Усі досліджені покриття, отримані методом ЕІЛ з використанням СТС, підвищують зносостійкість сталей 38Х2МЮА й 12Х18Н10Т. Згідно з результатами порівняльних випробувань покриттів, отриманих методом ХТО (карбонітрацією), іонним азотуванням та ЕІЛ з використанням СТС, на сталі 38Х2МЮА за зносостійкістю карбонітридні покриття, отримані методом ЕІЛ із СТС, не поступаються отриманим у солях дифузійним способом.

8. Розроблені наукові принципи практичної реалізації енергоефективних та екологічно безпечних технологій одержання функціональних покриттів, що ґрунтуються на методі ЕІЛ з використанням СТС, в поєднанні з іншими методами підвищення якості поверхневих шарів деталей (ППД, БУФО та ін.), і на їх підставі впроваджені у виробництво нові, захищені 34 патентами технології із загальним економічним ефектом 1 млн 171 тис. грн.

## ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Проблеми безпечної експлуатації компресорного та насосного обладнання в сучасній промисловості : колективна монографія / В. С. Марцинковський та ін. ; за ред. В. Б. Тарельника, Є. В. Коноплянченка. Суми : ФОП Литовченко Є. Б., 2020. 410 с.
2. Екологічна безпека експлуатації компресорного і насосного обладнання : монографія / В. А. Марцинковський, В. Б. Тарельник, Б. Антошевський та ін. ; за ред. О. В. Радіонова. Суми : Сумський державний університет, 2018. 282 с.
3. Современные энергоэффективные технологии реализации инженерных задач динамического оборудования : монография / под ред. В. А. Марцинковского, В. С. Марцинковского, В. Б. Тарельника и др. Сумы : Тритория, 2017. 292 с.
4. Assessment of Technological Capabilities for Forming Al-C-B System Coatings on Steel Surfaces by Electrospark Alloying Method / В. Antoszewski, О. Р. Gaponova, V. B. Tarelyk at al. *Materials*. 2021. 14. 739.
5. Повышение экологической безопасности формирования износостойких покрытий на поверхностях деталей типа тел вращения из стали 12Х18Н10Т с применением комбинированной технологии на основе электроискрового легирования / В.Б. Тарельник, О.П. Гапонова, В.Б. Лобода и др. *Электронная обработка материалов*. 2020. Т. 56 (5). С. 115–127.
6. Myslyvchenko O. M., Gaponova O. P., Tarelyk V. B., Krapivka M. O. The Structure Formation and Hardness of High-Entropy Alloy Coatings Obtained by Electrospark Deposition. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2020. Vol. 59 (3–4). P. 201–208.
7. Tarelyk V. B., Gaponova O. P., Myslyvchenko O. M., Sarzhanov B. O. Electrospark Deposition of Multilayer Coatings. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2020. Vol. 59 (1–2). P. 76–88.
8. Cementation of steel details by electrospark alloying / V. B. Tarelyk, O. P. Gaponova, G. V. Kirik et al. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2020. Vol. 42 (5). P. 655–667.
9. Effect of Laser Processing on the Qualitative Parameters of Protective Abrasion-Resistant Coatings / V. B. Tarelyk, Ye. V. Konoplianchenko, O. P. Gaponova et al. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2020. Vol. 58. P. 703–713.
10. Technology support for protecting contacting surfaces of half-coupling – Shaft press joints against fretting wear / V. Martsynkovskyy, V. Tarelyk, Ye. Konoplianchenko, O. Gaponova, M. Dumanchuk. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, 2020. P. 216–225.
11. Гапонова О. П., Гецович Є. М. Розробка технології нанесення Al-C-S покриттів сталених поверхонь методом електроіскрового легування. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів»*. 2020. № 1 (39). С. 3–6.
12. Гапонова О. П. Дослідження якості сульфалітованих покриттів на сталених поверхнях, отриманих методом електроіскрового легування. *Інженерія природокористування*. 2020. № 3. С. 86–93.

13. 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 / V. B. Tarelynyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko et al. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2019. Vol. 41, No. 3. P. 313–335.

14. Improvement of Quality of the Surface Electroerosive Alloyed Layers by the Combined Coatings and the Surface Plastic Deformation. II. The Analysis of a Stressedly-Deformed State of Surface Layer after a Surface Plastic Deformation of Electroerosive Coatings / V. B. Tarelynyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko et al. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2019. Vol. 41, No. 2. P. 173–192.

15. 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 / V. B. Tarelynyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko et al. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2019. Vol. 41, No. 1. P. 47–69.

16. Tarelynyk V. B., Gaponova O. P., Myslyvchenko O. M. Investigation of the Formation Processes of Aluminized Layers Obtained by Electrospark Alloying. Part I. Structural-Phase State of the Steel Surface after Aluminizing. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2019. Vol. 41, No. 10. P. 1377–1394.

17. Tarelynyk V. B., Gaponova O. P. Investigation of the Formation Processes of Aluminized Layers Obtained by Electrospark Alloying. Part II. Mathematical Model of the Aluminizing Process. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2019. Vol. 41, No. 1. P. 1483–1498.

18. Estimating qualitative parameters of aluminized coating obtained by electric spark alloying method / O. Gaponova, C. Kundera, G. Kirik et al. *Advances in Thin Films, Nanostructured Materials, and Coatings. NAP 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering.* Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2019. P. 249–266.

19. Тарельник В. Б., Гапонова О. П. Підвищення експлуатаційних характеристик і екологічної безпеки деталей машин та інструменту електроіскровим легуванням. *Компрессорное и энергетическое машиностроение.* 2019. № 1 (55). С. 2–7.

20. Гапонова О. П. Структурно-фазовий стан жаростійких покриттів, отриманих методом електроіскрового легування *Компрессорное и энергетическое машиностроение.* 2019. № 2 (55). С. 2–6.

21. Гапонова О. П. Аналіз якості комплексних сульфоцементованих покриттів, отриманих методом електроіскрового легування. *Наукові нотатки.* 2019. Вип. 67. С. 24–28.

22. Підвищення якості робочих поверхонь деталей з аустенітних хромонікелевих сталей методом електроіскрового легування / В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, О. М. Мисливченко та ін. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка.* 2019. Вип. 205: Проблеми надійності машин. С. 320–329.

23. Гапонова О. П. Аналіз якості сульфоцементованих покриттів, отриманих методом електроіскрового легування. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка.* 2019. Вип. 205: Проблеми надійності машин. С. 339–349.

24. Тарельник В. Б., Гапонова О. П., Саржанов Б. А. Спосіб екологічно безпечного зміцнення деталей з листової сталі методом електроерозійного легування графітовим електродом. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2019. № 2 (20). С. 118–126.

25. Improvement in Babbit Sliding Bearing Quality with Electrospark Alloying / V. B. Tarelnik, V. S. Martsinkovskii, E. V. Konoplyanchenko, A. V. Belous, O. P. Gaponova. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2018. Vol. 54, Issue 7–8. P. 598–604.

26. Quality Analysis of Aluminized Surface Layers Produced by Electrospark Deposition / G. V. Kirik, O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk et al. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2018. Vol. 56, Issue 11–12. P. 688–696.

27. The Analysis of a Structural State of Surface Layer after Electroerosive Alloying. II. Features of Formation of Electroerosive Coatings on Special Steels and Alloys by Hard Wear-Resistant and Soft Antifriction Materials / V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplyanchenko et al. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2018. Vol 40, No. 6. P. 795–815.

28. The Analysis of a Structural State of Surface Layer after Electroerosive Alloying. I. Features of formation of electroerosive coatings on steel 45 / V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplyanchenko et al. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2018. Vol. 40, No. 2. P. 235–254.

29. Electrospark Graphite Alloying of Steel Surfaces: Technology, Properties, and Application / V. B. Tarelnik, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, A. V. Belous, E. V. Konoplyanchenko, O. P. Gaponova. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2018. Vol. 54, No. 2. P. 147–156.

30. Ecologically Safe Process for Sulfo-Aluminizing Steel Parts / L. D. Plyatsuk, V. B. Tarelnyk, Cz. Kundera, O. V. Radionov, O. P. Gaponova. *Journal of Engineering Sciences*. 2018. Vol. 5, Issue 1. P. C 16–C 20.

31. Тарельник В. Б., Гапонова О. П., Радионов А. В. Повышение уровня экологической безопасности при использовании интегрированных способов повышения качества стальных деталей. *Наукові нотатки*. 2018. Вип. 63. С. 214–220.

32. Use of sulphiding by electroerosion alloying method for scuff resistance increase of steel and cast iron parts friction surfaces / V. B. Tarelnyk, V. S. Martsynkovskyy, Ye. V. Konoplianchenko, O. P. Gaponova, V. P. Yaremenko. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2018. № 11. С. 20–26.

33. Исследование свойств жаростойких функциональных покрытий, сформированных методом электроискрового легирования / В. Г. Кирик, В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова и др. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. 2018. № 4 (54). С. 17–22.

34. Tarelnyk V. B., Gaponova O. P., Konoplianchenko Ye. V., Dovzhyk M. Ya. Investigation of regularities of the processes of formation of surface layers with electroerosive alloying. Part II. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2017. Vol. 39, No. 3. P. 363–385.

35. Tarelnyk V. B., Gaponova O. P., Konoplyanchenko Ye. V., Dovzhyk M. Y. Investigation of regularities of the processes of formation of surface layers with

electroerosive alloying. Part 1. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2016. Vol. 38, No. 12. P. 1611–1633.

36. Спосіб сульфідуювання поверхні сталевих і чавунних деталей методом електроерозійного легування : пат. 117528 України на винахід, МПК В23Н 1/04 (2006.01), С23С 8/60 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Білоус А. В., Жуков О. М., Косенко П. В., Гапонова О. П. ; заявл. 24.11.2016 ; опубл. 10.08.2018, Бюл. № 15. 8 с.

37. Спосіб сульфоцементатії поверхні сталевій деталі : пат. 117867 України на винахід, МПК В23Н 1/00 В23Н 9/02, С23С 8/66 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Білоус А. В., Жуков О. М., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В. ; заявл. 22.12.2016 ; опубл. 10.10.2018, Бюл. № 19. 9 с.

38. Спосіб обробки поверхонь сталевих деталей : пат. 121343 України на винахід, МПК (2020.01) В23Н 1/06 (2006.01) В23Н 9/00 С23С 12/02 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В.; Тарельник Н. В., Думанчук М. Ю., Гончаренко М. В., Антошевський Б., Кундера Ч.; заявл. 29.05.2018; опубл. 12.05.2020, Бюл. № 9. 5 с.

39. Способ сульфоцементации стальных деталей : пат. 2663799 РФ на изобретение, МПК В23Н 1/00 (2006.01), В2Н 9/00 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковский В. С., Белоус А. В., Жуков А. Н., Гапонова О. П., Коноплянченко Е. В. ; заявл. 30.12.2016 ; опубл. 09.08.2018, Бюл. № 22. 15 с.

40. Способ восстановления изношенных поверхностей деталей машин из нержавеющей стали : пат. 2698001 РФ на изобретение, МПК В23Р 6/00 (2006.01), В23Н 5/02 (2006.01) / Марцинковский В. С., Тарельник В. Б., Гапонова О. П., Тарельник Н. В., Коноплянченко Е. В., Павлов О. Г., Саржанов Б. А., Антошевский Б. ; заявл. 26.09.2018 ; опубл. 21.08.2019, Бюл. № 24. 20 с.

41. Способ сульфоцементации стальных деталей : пат. RU 2707776 РФ на изобретение, С1 (51) МПК, В23Н 1/00 (2006.01), В23Н 9/00 (2006.01) / Марцинковський В. С., Тарельник В. Б., Тарельник Н. В., Коноплянченко Е. В., Гапонова О. П., Думанчук М. Ю., Гончаренко М. В., Антошевський Б., Кундера Ч. ; заявл. 25.07.2018 ; опубл. 29.11.2019, Бюл. № 34. 11 с.

42. Способ повышения износостойкости стальных деталей : пат. 2711074 РФ на изобретение, МПК В23Н 9/00 (2006.01), С23С 28/00 (2006.01) / Марцинковский В. С., Тарельник В. Б., Гапонова О. П., Тарельник Н. В., Коноплянченко Е. В., Саржанов А. А., Саржанов Б. А., Антошевский Б. ; заявл. 11.04.2019 ; опубл. 15.01.2020, Бюл. № 2. 18 с.

43. Способ алитирования стальных деталей : пат. RU 2696616С1 на изобретение, МПК В23Н9/00 (2006-01-01) / Марцинковський В. С., Тарельник В. Б., Тарельник Н. В., Коноплянченко Е. В., Гапонова О. П., Думанчук М. Ю., Гончаренко М. В., Антошевський Б., Кундера Ч. ; заявл. 04.06.2018 ; опубл. 06.08.2019, Бюл. № 22. 8 с.

44. Спосіб обробки поверхонь сталевих деталей : пат. 121346 України на винахід, МПК (2020.01) В23Н 1/06 (2006.01), В23Н 9/00, С23С 12/02 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Е. В., Тарельник Н. В., Думанчук М. Ю., Гончаренко М. В., Антошевський Б., Кундера Ч. ; заявл. 06.07.2018 ; опубл. 12.05.2020, Бюл. № 9. 8 с.

45. Спосіб відновлення зношених поверхонь деталей машин з нержавіючої сталі: пат. 121614 України на винахід: МПК (2020.01), В23Н 5/02 (2006.01), С23С 28/00 В23Р 6/00 / Тарельник В.Б., Марцинковський В.С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Тарельник Н. В., Павлов О. Г., Саржанов Б. О., Антошевський Б.; заявл. 12.09.2018; опубл. 25.06.2020, Бюл. № 12. 20 с.

46. Спосіб прогнозування якісних параметрів поверхневого шару при зміцненні сталевих деталей методом електроерозійного легування : пат. 121427 України на винахід, МПК (2020.01), В23Н 1/00, В23Н 1/04 (2006.01), В23Н 9/00, С23С 10/48 (2006.01), В23Р 6/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Лазоренко А. Д. ; заявл. 03.07.2018 ; опубл. 25.05.2020, Бюл. № 10. 19 с.

47. Спосіб підвищення зносостійкості сталевих деталей : пат. 123025 України на винахід, МПК (2021.01), В23Н 1/06 (2006.01), В23Н 9/00, С23С 4/067 (2016.01), С23С 4/10 (2016.01), С23С 4/131 (2016.01), С23С 12/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Тарельник Н. В., Саржанов О. А., Саржанов Б. О., Антошевський Б. ; заявл. 12.10.2020 ; опубл. 03.02.2021, Бюл. № 5. 16 с.

48. Спосіб формування пакетів гнучких елементів пружних муфт : пат. 123026 України на винахід, МПК (2021.01), F16D 3/56 (2006.01), С10М 101/02 (2006.01), С10М 103/04 (2006.01), С10М 111/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Думанчук М. Ю., Тарельник Н. В. ; заявл. 26.10.2020 ; опубл. 03.02.2021, Бюл. № 5. 6 с.

49. Спосіб сульфидування поверхні сталевих і чавунних деталей методом електроерозійного легування : пат. 115059 України на корисну модель, МПК (2017.01), В23Н 1/00, С23С 8/60 (2006.01), С22С 37/00, С22С 37/06, С22С 37/08 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Білоус А. В., Жуков О. М., Косенко П. В., Гапонова О. П. ; заявл. 24.11.2016 ; опубл. 27.03.2017, Бюл. № 6. 8 с.

50. Спосіб обробки поверхонь сталевих деталей : пат. 119316 України на корисну модель, МПК (2017.01), С23С 10/48 (2006.01), В23Н9/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Білоус А. В., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Антошевський Б., Кундера Ч., Жуков О. М. ; заявл. 27.02.2017; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 18. 16 с.

51. Спосіб сульфоцементації сталевих деталей : пат. 119318 України на корисну модель, МПК (2017.01), В23Н 1/00, В23Н 9/00, С23С 8/60 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Білоус А. В., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Антошевський Б., Кундера Ч., Жуков О. М. ; заявл. 27.02.2017 ; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 18. 9 с.

52. Спосіб підвищення зносостійкості робочих поверхонь сталевих кілець імпульсних торцевих ущільнень : пат. 119319 України на корисну модель, МПК (2017.01), В23Н 9/00, С23С 8/00, F16J 15/16 (2006.01), F16J 15/16 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Білоус А. В., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Антошевський Б., Кундера Ч., Жуков О. М. ; заявл. 27.02.2017 ; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 18. 9 с.

53. Спосіб насичення поверхні сталевих і чавунних деталей сіркою методом електроерозійного легування : пат. 119317 України на корисну модель, МПК (2017.01), В23Н 1/00, С23С 8/60 (2006.01) / Тарельник В. Б.,

Марцинковський В. С., Білоус А. В., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Антошевський Б., Кундера Ч., Жуков О. М. ; заявл. 27.02.2017 ; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 18. 8 с.

54. Спосіб алітування сталевих деталей : пат. 119707 України на корисну модель, МПК (2017.01), С23С 10/48 (2006.01), В23Н 9/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Білоус А. В., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Антошевський Б., Кундера Ч., Жуков О. М. ; заявл. 27.02.2017 ; опубл. 10.10.2017, Бюл. № 19. 22 с.

55. Спосіб алітування сталевих деталей: пат. 130157 України на корисну модель : МПК (2018.01), В23Н 1/00, В23Н 9/00, С23С 10/48 (2006.01), С23С 8/60 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Тарельник Н. В., Думанчук М. Ю., Гончаренко М. В., Антошевський Б., Кундера Ч. ; заявл. 29.05.2018 ; опубл. 26.11.2018, Бюл. № 22. 6 с.

56. Спосіб прогнозування якісних параметрів поверхневого шару при зміцненні сталевих деталей методом електроерозійного легування : пат. 130574 України на корисну модель, МПК (2018.01) В23Н 1/00, В23Н 9/00, С23С 10/48 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Лазаренко А. Д. ; заявл. 03.07.2018 ; опубл. 10.12.2018, Бюл. № 23. 19 с.

57. Спосіб сульфоцементації сталевих деталей : пат. 130866 України на корисну модель, МПК (2018.01), В23Н 1/00, В23Н 9/00, С23С 10/48 (2006.01), С23С 8/60 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Тарельник Н. В., Думанчук М. Ю., Гончаренко М. В., Антошевський Б., Кундера Ч. ; заявл. 06.07.2018 ; опубл. 26.12.2018, Бюл. №24. 8 с.

58. Спосіб відновлення зношених поверхонь деталей машин з нержавіючої сталі : пат. 131805 України на корисну модель, МПК (2018.01) В23Н 5/02 (2006.01), В23Р 6/00, С23С 28/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Тарельник Н. В., Павлов О. Г., Саржанов Б. О., Антошевський Б. ; заявл. 12.09.2018 ; опубл. 25.01.2019, Бюл. №2. 21 с.

59. Спосіб формування покриття на зношувальних поверхнях деталей : пат. 141919 України на корисну модель, МПК (2020.01) В23Н 5/00, В23Н 9/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Тарельник Н. В., Саржанов Б. О., Пирогов В. О., Лазаренко А. Д., Гапон О. О. ; заявл. 27.12.2019 ; опубл. 27.04.2020, Бюл. № 8. 8 с.

60. Спосіб формування покриття на зношувальних поверхнях деталей : пат. 141920 України на корисну модель, МПК (2020.01) В23Н 5/00, В23Н 9/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Тарельник Н. В., Саржанов Б. О., Пирогов В. О., Лазаренко А. Д., Гапон О. О. ; заявл. 27.12.2019 ; опубл. 27.04.2020, Бюл. № 8. 9 с.

61. Спосіб екологічно безпечного зміцнення деталей з листової сталі методом електроерозійного легування сталевих поверхонь графітовим електродом : пат. 141992 України на корисну модель, МПК (2020.01) В23Р 6/00, В23К 9/04 (2006.01), В23Н 5/00, В23Н 5/02 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Саржанов О. А., Гапон О. О., Саржанов Б. О., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В. ; заявл. 10.09.2019 ; опубл. 12.05.2020, Бюл. № 9. 9 с.

62. Спосіб виготовлення деталей з нержавіючої сталі з комбінованим електроіскровим покриттям на зношувальних плоских і криволінійних поверхнях :

пат. 142338 України на корисну модель, МПК (2020.01), В23Н 5/00, В23Н 9/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Тарельник Н. В., Саржанов Б. О., Пирогов В. О., Лазаренко А. Д., Гапон О. О. ; заявл. 11.01.2020 ; опубл. 25.05.2020, Бюл. № 10. 10 с.

63. Спосіб цементації сталевих деталей електроіскровим легуванням : пат. 142822 України на корисну модель, МПК (2020.01) С23С 8/00, С23С 28/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Мисливченко О. М., Пирогов В. О., Гапон О. О., Лазаренко А. Д. ; заявл. 11.02.2020 ; опубл. 25.06.2020, Бюл. № 12. 8 с.

64. Спосіб захисту деталей пари тертя пружної муфти від фретинг-корозії : пат. 142811 України на корисну модель : МПК (2020.01), С23F 15/00, F01D 5/28 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Думанчук М. Ю., Коноплянченко Є. В., Гапонова О. П., Тарельник Н. В., Пирогов В. О., Гапон О. О. ; заявл. 05.02.2020 ; опубл. 25.06.2020, Бюл. № 12. 8 с.

65. Спосіб формування пакетів гнучких елементів пружних муфт : пат. 137273 України на корисну модель, МПК (2019.01), F16D 3/70 (2006/01), С10М 103/00 / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Думанчук М. Ю., Тарельник Н. В. ; заявл. 15.04.2019 ; опубл. 10.10.2019, Бюл. № 19. 8 с.

66. Спосіб підвищення зносостійкості сталевих деталей : пат. 136895 України на корисну модель, МПК (2019.01), В23Н 9/00, С23С 8/60 (2006/01), С23С 10/48 (2006/01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Коноплянченко Є. В., Тарельник Н. В., Саржанов О. А., Саржанов Б. О., Антошевський Б. ; заявл. 02.04.2019 ; опубл. 10.09.2019, Бюл. № 17. 14 с.

67. Спосіб формування покриття на поверхні сталеві деталі методом електроіскрового легування : пат. 144932 України на корисну модель, МПК (2020.01), В23Н 1/00, В23Н 9/00, С23С 4/00, С23С 6/00, С23С 8/60 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Мисливченко О. М., Пирогов В. О., Гапон О. О., Лазаренко А. Д. ; заявл. 26.02.2020 ; опубл. 10.11.2020, Бюл. № 21. 15 с.

68. Спосіб азотування поверхонь сталевих деталей : пат. 145506 України на корисну модель, МПК (2020.01), С23С 8/00, С23С 8/26 (2006.01), С23С 14/06 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Саржанов О. А., Коноплянченко Є. В., Гапон О. О., Лазаренко А. Д., Мікуліна М. О. ; заявл. 04.08.2020 ; опубл. 10.12.2020, Бюл. № 23. 6 с.

69. Спосіб нітроцементації поверхонь сталевих деталей : пат. 146373 України на корисну модель, МПК (2021.01), С23С 8/00, С23С 8/22 (2006.01), С23С 8/26 (2006.01), С23С 14/06 (2006.01) / Тарельник В. Б., Марцинковський В. С., Гапонова О. П., Саржанов О. А., Коноплянченко Є. В., Гапон О. О., Лазаренко А. Д., Мікуліна М. О. ; заявл. 06.08.2020 ; опубл. 17.02.2021, Бюл. № 7. 8 с.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

70. Energy Dispersive X-Ray Microanalysis of Part Surface Layer Carburized by Electric Spark Alloying / V. Tarel'nyk, O. Gaponova, V. Martynkovskyy et al. *10th International Conference on «Nanomaterials: Applications and Properties», NAP 2020*. 2021. P. 01TFC13-1–01TFC13-9.



71. Increasing the Efficiency of Running-In the Titanium Nitride Nanostructures Formed on R6M5 and 12KH18N10T Steels by Sulphidizing with Electric Spark Alloying Method / I. Konoplianchenko, V. Tarelynyk, O. Gaponova et al. 10th International Conference on «Nanomaterials: Applications and Properties», NAP 2020. 2021. P. 01TFC14-1–01TFC14-8.

72. Assessment of hydroabrasive wear resistance of construction materials with functional coatings, which are formed by resource-saving and environmentally friendly technologies / V. Tarelynyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova, B. Sarzhanov et al. 7th International Conference on Actual problems of engineering mechanics, APEM 2020. 2020. Vol. 864 KEM. P. 265-277.

73. Zhylenko T., Tarelynyk V., Gaponova O., Hrytsyna A. Mathematical methods for the analysis of electrospark alloying of metal surfaces. *International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo 2019)*, Odessa, Ukraine, 2019. P. 1–4.

74. New Process for Forming Multicomponent Wear-Resistant Nanostructures by Electrospark Alloying Method / V. Tarelynyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova et al. *Microstructure and Properties of Micro- and Nanoscale Materials, Films, and Coatings (NAP 2019)*. Springer Proceedings in Physics. 2019. Vol. 240. P. 135–149.

75. Application of Multicomponent Wear-Resistant Nanostructures Formed by Electrospark Alloying for Protecting Surfaces of Compression Joints Parts / V. Tarelynyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova et al. *Microstructure and Properties of Micro- and Nanoscale Materials, Films, and Coatings (NAP 2019)*. Springer Proceedings in Physics. 2019. Vol. 240. P. 195–209.

76. Alternative Methods for Forming Sliding Surfaces of Face Impulse Seals / V. Tarelynyk, I. Konoplianchenko, V. Martsynkovskyy et al. 8th IEEE International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties, NAP 2018. 2018. P. 03TFNMC24.

77. Investigation of Qualitative Parameters of Surface Layers Formed By Stepwise Carburizing and Sulfo-Carburizing of Steel Parts With The Use of Electroerosion Alloying Method / V. Tarelynyk, I. Konoplianchenko, V. Martsynkovskyy et al. 8th IEEE International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties, NAP 2018. 2018. P. 03TFNMC26.

78. Zhylenko T., Gaponova O. Statistical analysis of aluminized coatings obtained by electrospark deposition. *International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics, UkrMiCo*. 2018.

79. New sulphiding method for steel and cast iron parts / V. Tarelynyk, V. Martsynkovskyy, O. Gaponova et al. 15th International Scientific and Engineering Conference Hermetic Sealing, Vibration Reliability and Ecological Safety of Pump and Compressor Machinery, *HERVICON+PUMPS*. 2017. Vol. 233, Issue 1. P. 012049.

80. New method for strengthening surfaces of heat treated steel parts / V. Tarelynyk, V. Martsynkovskyy, O. Gaponova et al. 15th International Scientific and Engineering Conference Hermetic Sealing, Vibration Reliability and Ecological Safety of Pump and Compressor Machinery, *HERVICON+PUMPS*. 2017. Vol. 233, Issue 1. P. 012048.

81. Гапонова О. П. Дослідження якості сульфюваніх покриттів на сталіних поверхнях, отриманих методами електроіскрового легування. *Сучасні проблеми землеробської механіки : матеріали XXI Міжнародної наукової*

конференції (м. Харків 17–18 жовтня 2020 року). Харків : Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка. 2020. С. 43–44.

82. Гапонова О. П., Голуб Н. Р., Мисливченко О. М. Дослідження структури та властивостей Al-C-V-покриттів, отриманих методом електроіскрового легування. *Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 10* : збірник матеріалів міжнародної наукової конференції (м. Київ, 10–11 грудня 2020 р.). Київ : Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2020. С. 117–120.

83. Оценка гидроабразивной износостойкости конструкционных материалов с функциональными покрытиями, сформированными ресурсосберегающими и экологическими технологиями / В. Б. Тарельник, Е. В. Коноплянченко, Б. А. Саржанов, О. П. Гапонова. *Актуальні проблеми інженерної механіки* : тези доповідей VII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Одеса, 12–15 травня 2020 р.). Одеса : Одеська державна академія будівництва та архітектури, 2020. С. 336–340.

84. Гапонова О. П., Голуб Н. Р. Дослідження структури та властивостей багатошарових зміцнених шарів, отриманих методом електроіскрового легування. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : матеріали та програма VII Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Суми, 21–24 квітня 2020 р.). Суми : Сумський державний університет, 2020. С. 101.

85. Гапонова О. П. Формування багатошарових зносостійких покриттів методом електроіскрового легування. *Сучасні технології в науці та освіті : матеріали третьої Міжнародної науково-практичної конференції* : у 2 ч. (м. Северодонецьк, 27–28 лютого 2020 р.). Северодонецьк : Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, 2020. Ч. 2 С. 24–26.

86. Гапонова О. П. Дослідження якості багатошарових покриттів, отриманих методом електроіскрового легування. *Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 9* : матеріали Міжнародної наукової конференції (м. Київ, 18–19 грудня 2019 р.). Київ : Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2019. С. 49–51.

87. Гапонова О. П., Саржанов Б. О. Підвищення якості сталеві поверхні при електроіскровому легуванні графітом. *Сучасні технології в науці та освіті : матеріали Другої міжнародної науково-практичної конференції* (м. Северодонецьк, 5–7 березня 2019 р.). Северодонецьк : Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, 2019. С. 162–164.

88. Голуб Н. Р., Гапонова О. П. До питання підвищення ресурсу та відновлення працездатності деталей машин шляхом формування функціональних покриттів. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : матеріали та програма VI Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Суми, 16–19 квітня 2019 р.). Суми : Сумський державний університет, 2019. С. 102.

89. Биченко М. М., Гапонова О. П. Перспективи застосування електроіскрового легування для підвищення якості робочих поверхонь деталей машин. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : матеріали та програма VI Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Суми, 16–19 квітня 2019 р.). Суми : Сумський державний університет, 2019. С. 108–109.

90. Підвищення якості робочих поверхонь деталей з аустенітних хромонікелевих сталей методом електроіскрового легування / В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Н. Р. Голуб та ін. *Проблеми надійності машин* : збірник матеріалів Міжнародної науково-методичної конференції, присвяченої пам'яті академіка В. Я. Аніловича (м. Харків, 12–13 листопада 2019 р.). Харків : Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка, 2019. С. 99–100.

91. Гапонова О. П. Аналіз якості сульфоцементованих покриттів, отриманих методом електроіскрового легування. *Проблеми надійності машин* : збірник матеріалів Міжнародної науково-методичної конференції, присвяченої пам'яті академіка В. Я. Аніловича (м. Харків, 12–13 листопада 2019 р.). Харків : Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка, 2019. С. 101–102.

92. Гапонова О. П. Исследование особенностей структурообразования и свойств электроискровых алитированных покрытий. *Сучасні технології в науці та освіті* : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (м. Сєверодонецьк, 19–22 лютого 2018 р.). Сєверодонецьк : Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, 2018. С. 184.

93. Жиленко Т. І., Гапонова О. П. Кінетичний аналіз поверхонь, отриманих методом електроіскрового легування. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2018* : тези доповідей Десятої міжнародної науково-практичної конференції (м. Дніпро, 27–9 березня 2018 р.). Дніпро : Національна металургійна академія України, 2018. С. 15.

94. Ніколаєнко А. С., Гапонова О. П. Метод нанесення захисного покриття на робочу поверхню деталі шляхом електроіскрового легування. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : матеріали та програма V Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції (м. Суми, 17–20 квітня 2018 р.). Суми : Сумський державний університет, 2018. С. 78.

95. Гапонова О. П., Биченко М. М., Зінченко І. Д. Аналіз якості комплексних покриттів, отриманих методом електроіскрового легування. *Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 8* : збірник матеріалів Міжнародної наукової конференції (м. Київ, 6–7 грудня 2018 р.). Київ, 2018. С. 121–122.

96. Гапонова О. П. Перспективи застосування електроіскрової обробки поверхні сталевих виробів. *Системи розроблення та постановлення продукції на виробництво. Індустрія 4.0. Сучасний напрямок автоматизації та обміну даними у виробничих технологіях* : матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції (м. Суми, 22–26 травня 2017 р.). Суми : Сумський державний університет, 2017. С. 66–67.

97. Гапонова О. П., Охріменко В. О. Дослідження зносостійкості комплексних боридних покриттів. *Системи розроблення та постановлення продукції на виробництво. Індустрія 4.0. Сучасний напрямок автоматизації та обміну даними у виробничих технологіях* : матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції (м. Суми, 22–26 травня 2017 р.). Суми : Сумський державний університет, 2017. С. 120–121.

98. Ніколаєнко А. С., Гапонова О. П. Удосконалення технології підвищення зносостійкості деталей машин електроіскровим легуванням. *Сучасні технології у*

*промислового виробництва* : матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій (м. Суми, 18–21 квітня 2017 р.) : у 2 ч. Суми : Сумський державний університет, 2017. Ч. 1. С. 120–121.

99. Охріменко В. О., Гапонова О. П. Особливості структуроутворення бор-хромових та бор-мідних покриттів на інструментальних сталях. *Сучасні технології у промислового виробництва* : матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій (м. Суми, 18–21 квітня 2017р.) : у 2 ч. Суми : Сумський державний університет, 2017. Ч. 1. С. 106–108.

100. Гапонова О. П., Ніколаєнко А. С. Жаростійкість алітованих покриттів, отриманих електроіскровим легуванням. *Матеріали для роботи в екстремальних умовах–7* : матеріали Міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 30 листопада – 2 грудня 2017 р.). Київ : Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2017. С. 112.

101. Гапонова О. П., Охріменко В. О. Комплексні дифузійні покриття під час борирування. *Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 7* : матеріали Міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 30 листопада – 2 грудня 2017 р.). Київ : Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2017. С. 113.

102. Гапонова О. П., Охріменко В. О. Структура і властивості боридних покриттів легованих міддю та хромом на інструментальних сталях. *Сучасні проблеми землеробської механіки* : збірник тез доповідей XVI Міжнародної наукової конференції (м. Суми, 17–18 жовтня 2016 р.). Суми : Сумський державний університет, 2016. С. 146–148.

103. Okhrimenko V. O., Gaponova O. P. Effect of heat treatment on structure and properties of austenite-martensite stainless steel. Системи розроблення та поставлення продукції на виробництво : матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції (м. Суми, 17–20 травня 2016 р.). Суми : Сумський державний університет, 2016. С. 107.

104. Панов Б. Ю., Гапонова О. П. Влияние предварительной холодной пластической деформации на диффузию углерода стали 20 : матеріали та програма IV Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції (м. Суми, 19–22 квітня 2016 р.) : у 2 ч. / редкол.: О. Г. Гусак, В. Г. Євтухов. Суми : Сумський державний університет, 2016. Ч. 1. С. 85.

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

105. Microstructure and Properties of AlCrFeCoNiCu<sub>x</sub> High-Entropy Alloys / M. V. Demchenko, O. P. Gaponova, O. M. Myslyvchenko et al. *Journal of Engineering Sciences*. 2018. Vol. 5, Issue 1. P. C 11–C 16.

106. Research of conductivity in polycrystalline films with a thin coating using the modified Mayadas – Shatzkes model / T. P. Novorun, O. A. Bilous, O. P. Gaponova et al. *Ukrainian Journal of Physics*. 2017. Vol. 62, No. 2. P. 132–139.

107. Дослідження структури та властивостей дифузійних покриттів на інструментальних сталях після бороміднення та борохромування / О. П. Гапонова, В. О. Охріменко, С. В. Марченко та ін. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. 2017. № 2. С. 8–11.

108. Gaponova O. P., Baglyuk G. A. Effect of temperature-rate strain conditions on the power variables and structurization during hot-forging of the sintered Cu-2% Ti billets. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2016. Vol. 55, No. 7–8. P. 406–412.

109. Gaponova O. P., Hovorun T. P. The theoretical analysis of a dynamic softening in the sintered materials. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2015. Vol. 37, No. 8. P. 1113–1123.

110. Pogrebnjak O. D., Dyadyura K. O., Gaponova O. P. Features of thermodynamic processes on contact surfaces of multicomponent nanocomposite coatings with hierarchical and adaptive behaviour. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2015. Vol. 37, No. 7. P. 899–919.

111. Gaponova O. P., Kolosyuk A. G. Researches of diffusion processes in powder materials and their role in structure formation. *Ukrainian Journal of Physics*. 2014. Vol. 59, No. 10. P. 1013–1019.

## АНОТАЦІЯ

**Гапонова О. П.** Керування властивостями поверхонь сталевих деталей електроіскровим легуванням у спеціальних технологічних середовищах. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство (13 – механічна інженерія). Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка МОН України, Харків, 2021.

У дисертаційній роботі наведені науково обґрунтовані результати, що узагальнюють та забезпечують вирішення актуального науково-технічного завдання – підвищення довговічності деталей динамічного обладнання шляхом керування структурою та властивостями сталевих поверхонь за рахунок комплексного впливу електроіскровим легуванням (ЕІЛ) із застосуванням спеціального технологічного середовища (СТС). На основі досліджень розроблена низка технологій насичення поверхні одним або одночасно кількома елементами СТС, що наноситься на оброблювану поверхню, з подальшим ЕІЛ, що дозволяє забезпечити комплекс властивостей і отримання покриттів високої якості. Узагальнені закономірності впливу чинників (склад електродних матеріалів та СТС, енергетичні та технологічні параметри обробки методом ЕІЛ) на структурний стан обробленої поверхні дозволяє обґрунтовано запропонувати матеріали та склад СТС для забезпечення необхідних властивостей поверхні найбільш економічним способом.

Проведений аналіз особливостей структуро- та фазоутворення однокомпонентних та багатокомпонентних шарів, отриманих методом ЕІЛ із застосуванням СТС. Показано, за рахунок використання СТС, можливо збільшити глибину дифузійного шару (цементация), забезпечити зниження мікротвердості поверхні (сульфідування), зміцнити поверхневий шар (цементация, азотування, алітування), забезпечити підвищення жаростійкості (алітування). Згідно запропонованого способу цементации методом ЕІЛ (ЦЕІЛ) з використанням СТС вдалося збільшити зміцнений шар до 230 мкм і досягти твердості до 10796 МПа при 100 % суцільності легованого шару. Отримані сульфідні покриття товщиною до 75

мкм. Досліджений новий спосіб азотування методом ЕІЛ з використанням СТС. Отримані покриття мають високу мікротвердість (до 9160 МПа) і товщину шару (до 50 мкм).

Рентгенографічні дослідження показали, що у сульфоалітованих покриттях у поверхневому шарі утворюються інтерметаліди  $\text{FeAl}$  і  $\text{FeAl}_2$ . За рахунок введення аморфного бору у СТС вдалося збільшити твердість покриття до 12350 МПа на сталі 40. Результати рентгеноструктурного аналізу Al-C-B покриттів свідчать про те, що вони характеризуються наявністю, крім твердих розчинів ОЦК і ГЦК зі збільшеними параметрами кристалічної ґратки, інтерметалідів  $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$  та легованого цементиту  $\text{Fe}_3(\text{CB})$ .

Металографічні та дюрOMETричні дослідження показали, що сульфомолібденові покриття складаються з чотирьох зон: верхнього пухкого шару з мікротвердістю  $H\mu = 1\ 112\text{--}2\ 040$  МПа, «білого» зміцненого шару з  $H\mu = 5\ 147\text{--}5\ 474$  МПа для  $W_p = 0,13$  Дж і  $H\mu = 10\ 596\text{--}10\ 731$  МПа для  $W_p = 3,4$  Дж, дифузійної зони і основного металу. Рентгеноструктурний аналіз отриманих покриттів свідчить про те, що в покритті сталі 20 дисульфід молібдену утворюється вже за енергії розряду  $W_p = 0,55$  Дж (3,77 %), а за  $W_p = 3,4$  Дж його близько 8 % на поверхні й близько 5 % на глибині до 15 мкм. Покриття, сформовані в послідовності ЦЕІЛ → → ЕІЛ Al → ЕІЛ Т15К6, мають найбільшу зону підвищеної твердості (320–360 мкм) і найменшу шорсткість поверхні (7,5 мкм). Завдяки утворенню 62 % (мас.) TiC та інтерметалідів забезпечується максимальна мікротвердість поверхневого шару (більша ніж 11 500 МПа).

На підставі експериментальних досліджень запропоновані математичні моделі (рівняння товщини, мікротвердості, шорсткості й суцільності поверхневого шару), що дають можливість прогнозувати за енергетичними параметрами основні показники якості сформованого шару: приріст, мікротвердість, шорсткість і суцільність, а отже, установлювати структуру подальшого технологічного впливу іншими методами (ППД, БУФО та ін.) для забезпечення необхідних властивостей поверхні. Проведений статистичний та кінетичний аналізи процесу конденсації речовини під час ЕІЛ з використанням СТС, способом побудови фазових портретів, що дозволяє описати експериментальні дані, згідно з результатами яких, зі збільшенням потужності розряду збільшується товщина і мікротвердість зон покриття.

Розроблені наукові принципи практичної реалізації енергоефективних та екологічно безпечних технологій одержання функціональних покриттів, заснованих на методі ЕІЛ з використанням СТС, захищені 34-ма патентами та впроваджені у виробництво із загальним економічним ефектом 1 млн 171 тис. грн.

**Ключові слова:** електроіскрове легування, якість поверхні, мікроструктура, мікротвердість, зносостійкість, математична модель.

## АННОТАЦІЯ

**Гапонова О. П.** Управление свойствами поверхностей стальных деталей электроискровым легированием в специальных технологических средах. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по

специальности 05.02.01 – материаловедение (13 – механическая инженерия). Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко МОН Украины, Харьков, 2021.

В диссертационной работе приведены научно обоснованные результаты, обобщающие и обеспечивающие решение актуальной научно-технической задачи – повышение долговечности деталей динамического оборудования путем управления структурой и свойствами стальных поверхностей за счет комплексного воздействия электроискровым легированием (ЭИЛ) с применением специальной технологической среды (СТС).

На основе исследований разработаны новые способы насыщения поверхности одним или одновременно несколькими элементами путем нанесения на обрабатываемую поверхность СТС с последующим ЭИЛ. Обобщены закономерности влияния факторов (состава электродных материалов и СТС, энергетических и технологических параметров обработки) на структурное состояние обработанной поверхности, позволяющие обоснованно предлагать материалы и состав СТС для обеспечения необходимых свойств поверхности экономичным способом. Разработана математическая модель прогнозирования параметров качества поверхностных слоев, полученных методом ЭИЛ с использованием СТС. Согласно предлагаемой модели рассчитаны основные показатели, позволяющие для данной пары электродных материалов прогнозировать толщину покрытия, его микротвердость, сплошность, шероховатость. Разработаны научные принципы практической реализации энергоэффективных и экологически безопасных технологий получения функциональных покрытий, основанные на методе ЭИЛ с использованием СТС, защищены патентами и внедрены в производство.

**Ключевые слова:** электроискровое легирование, качество поверхности, микроструктура, микротвердость, износостойкость, математическая модель.

## ANNOTATION

**Gaponova O. P.** Control of surface properties of steel parts by electrospark alloying in special technological environments. – As a manuscript.

Thesis for Doctor of Sciences Degree of specialty 05.02.01 – Materials Science (13 – Mechanical Engineering). – Petro Vasilenko Kharkiv National Technical University of Agriculture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The dissertation work presents scientifically substantiated results that generalize and provide a solution to an urgent scientific and technical problem – increasing the durability of dynamic equipment parts by controlling the structure and properties of steel surfaces due to the complex effect of electrospark alloying (ESA) using a special technological environment (STE). Based on the research, new methods of obtaining single-component and multicomponent coatings by the ESA method with the use of STE have been developed. These methods include the application of STE to the treated surface, then ESA. It allows providing a complex of properties and obtaining high quality coatings. Generalized regularities of the influence of factors (composition of electrode materials and STE, energy and technological parameters of ESA) on the structural state of the treated surface allow to reasonably proposing materials and composition of STE to ensure the required surface properties in the most economical way.

The analysis of structure and phase formation of one-component and multicomponent layers obtained by the ESA method with the use of STE is carried out. It is shown, due to the use of STE, it is possible to increase the depth of the diffusion layer (cementation), to reduce the microhardness of the surface (sulfidation), to strengthen the surface layer (cementation, nitriding, aluminizing), to increase heat resistance (aluminizing). According to the proposed method of cementation by the method of ESA (CESA) using STE managed to increase the hardened layer to 230  $\mu\text{m}$  and achieve a hardness of 10 796 MPa at 100 % continuity of the doped layer. The sulfide coatings obtained to 75  $\mu\text{m}$ . A new method of nitriding by ESA using STE was investigated. The obtained coatings have a high microhardness (up to 9 160 MPa) and a layer thickness (up to 50  $\mu\text{m}$ ).

New approaches to the theoretical assessment of the quality of coatings obtained by the ESA method have been developed. The mathematical model has been developed for predicting the quality parameters of surface layers obtained by the ESA method using STE, which makes it possible to predict the structure and main parameters of the coating. Based on the analysis of experimental data according to the proposed model, the main indicators of the model are calculated, which allow predicting the thickness of the coating, its microhardness, continuity, and roughness for a given pair of electrode materials.

**Key words:** electrospark alloying, surface quality, microstructure, microhardness, wear resistance, mathematical model.







Підписано до друку 18.03.2021.  
Формат 60x90/16. Ум. друк. арк. 2,3. Обл.-вид.арк. 1,9. Тираж 100 пр. Зам. №  
Собівартість вид. грн к.

Видавець і виготовлювач  
Сумський державний університет,  
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.