

До спеціалізованої вченої ради Д 64.832.04
в Харківському національному технічному університеті
сільського господарства імені Петра Василенка

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію **Гапонової Оксани Петрівни** на тему:
Керування властивостями поверхонь сталених деталей електроіскровим
легуванням у спеціальних технологічних середовищах, поданої
на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – «Матеріалознавство»
Технічні науки (13 Механічна інженерія)

Дисертаційна робота Гапонової О.П., що подана до захисту, спрямована на вирішення важливої науково-технічної проблеми – створення енергоефективних та екологічно безпечних технологій отримання функціональних покриттів, що базуються на методі ЕІІ з використанням спеціального технологічного середовища, оцінювання і прогнозування структурного стану поверхонь після їх оброблення.

Дисертаційна робота Гапонової О.П. пов'язана з виконанням наукових програм 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.

Науково-дослідні роботи, що виконувались у межах вказаних наукових програм, є свідченням затребуваності науково-дослідних робіт з даного напрямку, і, відповідно, вказують на актуальність дисертаційного дослідження.

В дисертації авторкою було узагальнено результати робіт таких вчених, як Б. Р. Лазоренко, Н. Й. Лазоренко, Б. Н. Золотих, А. Є. Гітлевича, В. В. Михайлова, А. Д. Верхотурова, С. М. Хімухіна, Т. С. Скобло, І. О. Подчерняєвої, В. Б. Тарельника, В. Antoszewski, N. Radek та ін.. Глибокий аналіз літературних джерел показав, що інноваційний розвиток технологій нанесення покриттів для екстремальних умов експлуатації пов'язаний із застосуванням композиційних матеріалів, в яких вибором структурних складових можна керувати процесами фазоутворення і отримувати покриття з заданими експлуатаційними властивостями.

Дисертантка Гапонова О.П. обґрунтувала, що для забезпечення підвищення довговічності деталей динамічного обладнання доцільно використовувати розроблені в рамках даної роботи комплексні технології насичення поверхонь одним або одночасно кількома елементами

спеціального технологічного середовища, що наноситься на оброблювану поверхню, з подальшим електроіскровим легуванням. Такі технологічні рішення ефективно впливають на процес керування структурою сталених поверхонь, що дозволяє отримувати покриття з високим рівнем експлуатаційних властивостей.

Розроблені нові способи управління структурою поверхневого шару шляхом ЕІЛ із застосуванням СТС, в склад якого можна вводити не тільки елементи струмопровідного матеріалу анода, що складається, наприклад, з металу або графіту, а й діелектрики, наприклад, сірку, бор і ін. шляхом введення їх в рідку мікрованну, що утворюється при локальних електроіскрових розрядах. Особливістю пропонованого способу є те, що СТС містить необхідний елемент у вільному вигляді чи у сполучі, що під час проходження електричного

Застосування комбінованої технології ЕІЛ+СТС суттєво розширює діапазон використання електрофізичних покриттів в залежності від вимог в яких працюють зміцненні деталі обладнання. В залежності від умов експлуатації можливо збільшити глибину дифузійного шару (цементация), забезпечити зниження мікротвердості поверхні (сульфидування), зміцнити поверхневий шар (цементация, азотування, алітування), забезпечити підвищення жаростійкості (алітування).

В роботі розроблено математичні моделі, які дозволяють прогнозувати, як будуть впливати різноманітні технологічні параметри, а саме енергетичні параметри нанесення покриттів, склад електродного матеріалу, склад СТС на приріст, мікротвердість, шорсткість і суцільність покриттів. Запропоновані розрахунки збігаються з отриманими експериментальними результатами.

Наведені обставини стали підґрунтям для формулювання дисертанткою Гапоною О.П. актуальної науково-технічної проблеми, що полягала у створенні 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.

Вирішення сформульованої дисертанткою Гапоною О.П. науково-технічної проблеми відкриває шляхи одержання високоефективних електроіскрових покриттів у спеціальних технологічних середовищах з керованою структурою і прогнозовано високими функціональними властивостями.

Наведені факти характеризують тему рецензованої дисертації як *актуальну*, та підтверджують її відповідність вимогам за ознакою «актуальність обраної теми дисертації».

Оцінка обґрунтованості наукових положень дисертації, висновків і рекомендацій, їх достовірність і новизна

Обґрунтованість наукових положень дисертаційного дослідження Гапоною О.П, їх переконливість, ґрунтовність висновків та рекомендацій, виконаних за результатами роботи, обумовлені використанням для їх одержання великої кількості різнопланових методів досліджень та найсучасного експериментального обладнання. Серед них використовувався системний підхід до теоретичних та експериментальних напрямів досліджень на основі аналізу й узагальнення виконаних розробок з використання матеріалів і технологічних процесів одержання покриттів. У роботі було використано сучасне експериментальне устаткування: ЕІЛ-8А, ЕІЛ-9 і Елітрон-52А; структурно-фазовий склад електродних матеріалів та покриттів, а також доріжок тертя досліджували на електронних мікроскопах РЕММ-102, JEOL JSM-5400 і SEM Inspect S50-B; дюрOMETричний аналіз проводили на мікротвердомірі ПМТ-3; рентгенографічні дослідження проводили в $\text{CuK}\alpha$ та $\text{CoK}\alpha$ випромінюванні на дифрактометрах ДРОН-3 та AXRD Benchtop; випробування на жаростійкість електродних матеріалів та покриттів проводили ваговим методом (ГОСТ 6130-71) після витримки зразків 50-100 годин в

електричній печі опору при температурі 980°C; зносостійкість модифікованих поверхонь та покриттів визначали на розробленому устаткуванні.

Достовірність одержаних у дисертаційній роботі результатів, положень, висновків і рекомендацій підтверджено співпаданням результатів експериментів, отриманих різними експериментальними методами, застосуванням сучасного високоточного експериментального обладнання, а також апробацією результатів досліджень в умовах виробництва, про що свідчить затверджена технічна документація, яку наведено у «Додатках» до дисертації.

Результати всебічних досліджень, що отримані автором з використанням перелічених методів, надали надійну і взаємоузгоджену інформацію про особливості структуроутворення та комплекс властивостей вискоелективних для покриттів триботехнічного призначення, одержаних за розробленими технологіями, відпрацьованими в процесі виконання дисертації.

Обґрунтовані положення і висновки рецензованої роботи не вступають у протиріччя з фундаментальними основами матеріалознавства, металознавства.

Вирішення поставленої науково-технічної проблеми дозволило Гапонові О.П. одержати низку нових результатів, що являть собою наукову новизну дисертації. Вважаю за необхідне наголосити на найважливіших положеннях:

Вперше:

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

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

- Отримано азотовані та нітроцементовані поверхні сталей деталей новим екологічно безпечним і менш енергозатратним методом ЕІЛ з використанням СТС. Встановлено взаємозв'язок між структурою та параметрами ЕІЛ.

- Проведено одночасне насичення сталі вуглецем, алюмінієм і бором методом ЕІЛ із застосуванням СТС. Встановлено, що фазовий склад покриттів на сталях представлений твердими розчинами ОЦК та ГЦК, інтерметалідом Fe_4Al_3 і легованим бороцементитом $Fe_3(CB)$. Утворення цих фаз сприяє значному зміцненню і підвищенню мікротвердості поверхневого шару до 12ГПа.

- Під час дослідження сульфомолібденових покриттів, отриманих методом ЕІЛ із застосуванням СТС, за допомогою рентгенографічного аналізу встановлена наявність дисульфиду молібдену на поверхні (до 8 % за мас.), що запобігає схоплюванню поверхонь тертя в період припрацювання і сприяє підвищенню зносостійкості та довговічності деталей у трибоспряженнях.

- 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. Розроблена модель описує особливості утворення покриттів під час ЕІЛ із застосуванням СТС.

З моєї точки зору, наведені дані позитивно характеризують наукові напрацювання дисертантки Гапонові О.П. і свідчать про вагомість одержаних результатів та узагальнень, що дозволило авторці розробити склад та встановити технологічні режими отримання модифікованих

робочих поверхонь та електроіскрових покриттів з високим рівнем корозійної стійкості при температурах до 1000 °С та зносостійкості.

Значимість результатів дисертаційної роботи для науки і практики

Наукова та практична значимість дисертації Гапонової О.П. полягає в тому, що авторка на основі експериментальних досліджень здійснила інноваційну розробку методології керування структурним станом поверхневих шарів синтезованих методом ЕЛ із застосуванням СТС. Це дозволяє вводити в процес модифікування робочих поверхонь ДО не тільки елементи струмопровідного матеріалу анода, що складається, наприклад, з металу або графіту, а й діелектрики, наприклад, сірку, бор і ін. шляхом введення їх в рідку мікрочастинку, що утворюється при локальних електроіскрових розрядах. Узагальнено закономірності впливу чинників (складу електродних матеріалів та СТС, енергетичних і технологічних параметрів обробки методом ЕЛ) на структурний стан обробленої поверхні. Їх урахування дозволяє обґрунтовано пропонувати матеріали й склад СТС для забезпечення необхідних властивостей поверхні найбільш економічним способом.

Використання СТС дозволяє отримувати покриття з високим рівнем наперед заданих властивостей і, як наслідок, суттєво розширює діапазон застосування технології електроіскрового модифікування робочих поверхонь в різномарітних умовах експлуатації.

Наприклад, відомо що в трибовузлах ефективно працюють сульфід молібдену, які суттєво знижують коефіцієнти тертя в зоні трибоспряження. Розроблений Гапоною О.П. метод нанесення покриттів молібденовим електродом з використанням в якості СТС сірчаної пасти з додаванням колоїдної сірки дозволяє отримувати покриття з відносно високим вмістом сульфідів молібдену. Такі покриття володіють високим рівнем зносостійкості і їх рекомендовано використовувати в вузлах тертя.

Прикладом використання комбінованих технологій ЕЛ+СТС може бути алітування, Al+C+S, Al+C+B, Al+T15L6

Мені видається, що вагомим науковим доробком є встановлення закономірностей структуро- і фазоутворення функціональних покриттів, отриманих методом ЕЛ з використанням СТС. Отримані дані дозволяють з високою точністю прогнозувати основні технологічні параметри покриття з метою забезпечення надійності та довговічності деталей динамічного обладнання (ДО).

Вважаю за необхідне зазначити, що важливим практичним напрацюванням дисертанта є дослідно-виробнича перевірка результатів дисертаційного дослідження, а саме, розробки Гапоною О.П. пройшли апробацію в виробничих умовах підприємства ТОВ «ТРИЗ», м. Суми, АТ «Сумський завод насосного та енергетичного машинобудування «НАСОСЕНЕРГОМАШ», ТОВ «Науково-впровадницьке підприємство СУМИПЛАСТПОЛІМЕР», АТ «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання», ПАТ «Сумхімпром», КП «Міськводоканал». Очікуваний економічний ефект від упровадження нових технологій, захищених патентами, становить 1 млн 171 тис. грн.

Розробки, які виконані в дисертаційній роботі, використовуються в учбовому процесі: лекційних курсах для бакалаврів, магістрів та аспірантів за спеціальностями «Матеріалознавство», «Галузеве машинобудування» та використовувались при підготовці методичних матеріалів (курси «Наплавлення та споріднені технології», «Технологія нанесення та властивості покриттів», «Дизайн нових матеріалів», «Технологія виробництва та обробки матеріалів», «Наукові основи вибору матеріалу і прогресивних зміцнюючих технологій», «Механічні властивості та зносостійкість матеріалів і виробів», «Сплави з особливими властивостями»).

Вищевказане переконливо свідчить про високу наукову та практичну значимість виконаного Гапоною О.П. дисертаційного дослідження.

На мою думку різнобічні дослідження, наукові та практичні результати яких представлено у дисертації, відрізняються системністю, коректністю та обґрунтованістю накопиченого фактажу, який отримано із застосуванням сучасних методів досліджень та обладнання, і підтверджених практичною апробацією в умовах промислового виробництва.

Повнота викладу основних результатів дисертації

Основні результати рецензованої дисертаційної роботи Гапонової О.П. опубліковано у 111 наукових працях: 3 монографіях у співавторстві, 33 статтях у виданнях, що входять до Переліку МОН України; і 6 статтях у закордонних виданнях; 25 статей входять до міжнародних наукометричних баз даних SCOPUS та/або Web of Science. Отримано 34 патенти (з яких 13 на винахід), опубліковано 35 матеріалів і тез у збірниках доповідей наукових конференцій..

Загалом вимоги стосовно повноти публікацій та апробації результатів дисертації Гапонової О.П. виконано у повному обсязі.

Оцінка змісту дисертаційної роботи

Дисертація Гапонової О.П. складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 568 сторінок, у тому числі, 12 додатків 134 рисунків, 61 таблиці. Список використаних джерел нараховує 359 найменування.

Вступ дисертації достатньо повно розкриває сутність та сучасний стан науково-технічної проблеми, аргументи, що зумовили її постановку; автором обґрунтовано актуальність обраної теми дисертації, наведено зв'язок роботи з науковою програмою, мету роботи, задачі, об'єкт, предмет і методи досліджень, сформульовано наукову новизну, визначено практичну значимість одержаних результатів, наведено особистий внесок здобувача, апробацію результатів досліджень, публікації за темою дисертації та структуру роботи.

У **першому розділі** дисертантка Гапонова О.П. докладно висвітлила сучасний стан питання та узагальнення щодо відомих розробок і тенденцій розвитку технологій нанесення ЕІЛ покриттів. Зроблено огляд науково-технічної інформації стосовно розробки нових технологічних методів і матеріалів з метою підвищення експлуатаційних властивостей покриттів.

Аналіз літературних джерел показав, що для забезпечення технологічності процесу нанесення захисних покриттів методами електроіскрового легування доцільно використовувати комбіновані технологічні методи модифікування робочих поверхонь деталей та вузлів з керованою структурою.

Особливу увагу дисертантка приділила питанням досліджень щодо вивчення процесу ЕІЛ з метою збільшення твердості і зносостійкості робочих поверхонь. Технологія ЕІЛ може ефективно конкурувати, а в деяких випадках і замінювати такі технології ХТО як цементация, дифузійна металізація алюмінієм, хромом, титаном та ін., які потребують дорогого і громіздкого обладнання, є трудомісткими, тривалими за часом, екологічно небезпечним. Метод ЕІЛ дозволяє створювати якісні покриття із заданим комплексом фізико-механічних властивостей.

Авторка дисертації приділяє значну увагу огляду публікацій присвячених сучасним методам нанесення функціональних покриттів, особливостям формування поверхневих шарів при ЕІЛ, створенню одно- та багатокомпонентних компонентних шарів на металевих поверхнях методом ЕІЛ.

Втім шляхом критичного аналізу дисертанткою було зроблено висновок, що на сьогодні відсутні узагальнюючі дані досліджень процесів отримання методом ЕІЛ різних функціональних покриттів: м'яких припрацювальних (сульфідування, сульфоцементация, комплексні покриття), захисних (алітування, сульфоалітування, комплексні покриття), зносостійких (борування, бороалітування, бороцементация) та ін. Майже недослідженими є процеси структуро- і фазоутворення, відсутні експериментальні та розрахункові дані, щодо впливу параметрів ЕІЛ на якість електроіскрових покриттів. Особливий інтерес мають методи насичення поверхні одним або одночасно кількома елементами з використанням нової технології – нанесення на поверхню, що обробляється, СТС з подальшим ЕІЛ. Цей новий екологічно чистий і прогресивний метод потребує глибокого вивчення з позицій матеріалознавства, проведення досліджень щодо впливу складу СТС, режимів ЕІЛ на структуру, фазовий склад, фізико-механічні та триботехнічні властивості поверхонь, що обробляються, встановлення найбільш ефективного і обґрунтованого поєднання «склад СТС – легуючий електрод – режими ЕІЛ - матеріал, що підлягає обробленню».

Як завершення розділу 1 здобувачка Гапонова О.П. формулює головний напрямок дисертаційних досліджень та шляхи вирішення поставлених завдань.

Мені видається, що огляд літературних вітчизняних і закордонних джерел та наступні узагальнення аналітичних даних, що виконані шляхом критичного аналізу, дозволили здобувачеві Гапонові О.П. переконливо обґрунтувати доцільність виконання досліджень з означеної теми, визначити мету і завдання роботи та окреслити шляхи їх реалізації.

У другому розділі дисертації здобувачка Гапонова О.П. висвітлює узагальнену методологію виконання дисертаційної роботи. Авторкою сформовано методологічний підхід до виконання досліджень, який дозволив визначити послідовність проведення експериментів, спрямованих на досягнення сформульованої мети роботи.

У даному розділі представлено методологічну схему модифікування робочих поверхонь вузлів та деталей ДО методом ЕІЛ із застосуванням СТС. В якості основного технологічного устаткування в дисертаційній роботі використовували установки ЕІЛ-8А, ЕІЛ-9 і Елітрон-52А в діапазоні енергій розряду (W_p) від 0,04 до 6,8 Дж. Формування покриттів методом ЕІЛ проводили електродами із алюмінію (при алітуванні) і молібдену (при формуванні молібденвмісних покриттів), також графіту.

Авторкою дисертаційної роботи Гапоновою О.П. розроблено принципово нові способи керування структурою поверхневого шару шляхом ЕІЛ із застосуванням СТС, в склад якого можна вводити не тільки елементи струмопровідного матеріалу анода, що складається, наприклад, з металу або графіту, а й діелектрики, наприклад, сірку, бор і ін. шляхом введення їх в рідку мікрочастинку, що утворюється при локальних електроіскрових розрядах.

Приведено методики формування **однокомпонентних** поверхневих шарів, отриманих методом електроіскрового легування, із застосуванням СТС:

- алітування (патенти на корисну модель No119316 UA та 119707 UA),
- цементация (патенти на корисну модель No141992 UA та 142822 UA),
- сульфідування (патенти на корисну модель No115059 UA, 117528 UA та 119317 UA),
- азотування і нітроцементация (патенти України на корисну модель, номери заявок u202005096 і u202005065;

та формування **багатокомпонентних** поверхневих шарів, отриманих методом електроіскрового легування із застосуванням СТС:

- сульфоцементация (патенти на винахід No2663799 RU, на корисну модель 117867 UA, 119318 UA),

- сульфоалітування (патенти на винахід No121343 UA та 2696616 RU, корисну модель 130157),

-Al+C+S – покриття (патенти на винахід No 121346 UA и 2707776 RU, корисну модель No130866 UA),

-Al+C+B – покриття

-Mo+S – покриття (патент України на корисну модель No144932 UA),

-комбіновані C-Al-Ti5K6 покриття (патент на корисну модель No142338UA).

Особливістю запропонованого способу є те, що СТС містить необхідний елемент у вільному вигляді чи у сполуці, що під час проходження електричного розряду дифундує у поверхню, а процес ЕІЛ здійснюють електродом-інструментом зі струмопровідного матеріалу (метал, сплав, графіт). В результаті залежно від складу електродних матеріалів та СТС формуються покриття необхідного складу і заданими властивостями.

Для вивчення структурно-фазового складу електродних матеріалів та покриттів, використовувались методи рентгенофазового аналізу (РФА) (ДРОН-3, AXRD Benchtop, виробник Proto Manufacturing Inc., США), металографічного аналізу на мікроскопах «МІМ-7», «Неофот-2», растрового електронного мікроскопа РЕММ-102, та мікрорентгеноспектрального аналізу (МРСА) з використанням скандувального електронного мікроскопа Jeol JSM-5400, оснащеного мікроаналізатором ISIS 300 Oxford instruments та скандувального електронного мікроскопа SEO-SEM Inspect S50-B, оснащеного енергодисперсійним спектрометром AZtecOne з детектором X-MaxN20 (виробник Oxford Instruments plc). ДюрOMETричний аналіз проводився на мікротвердомірі ПМТ-3.

Випробування на жаростійкість металів і сплавів проводиться згідно до стандарту, який визначає методи дослідження жаростійкості в умовах впливу газових середовищ і повітря при високих температурах. Жаростійкість визначалася після витримки зразків у печі протягом заданого часу при постійній температурі, ваговим методом по збільшенню маси зразків.

Триботехнічні властивості оцінювали експрес методом шляхом фіксації величини лінійного зношування зразків із покриттям на розробленій установці.

З моєї точки зору, даний розділ дисертації Гапонової О.П. є надзвичайно значущим розділом, який розкриває обґрунтований напрям досліджень та методи вирішення задач, поставлених у роботі.

Вказане демонструє послідовний та системний підхід авторки до вирішення важливої науково-технічної проблеми, що поставлена у дисертації.

На мою думку, сформована дисертантом Гапоноюю О.П. методика проведення всебічних досліджень, що викладена у розділі 2, забезпечила одержання достовірних та коректних результатів.

Вважаю, що загалом даний розділ дисертації свідчить про логічні та чіткі напрямки реалізації поставленої мети роботи, та підтверджує здатність авторки ставити і послідовно розв'язувати складні наукові завдання, застосовувати найсучасніші методики та обладнання, співставляти і аналізувати одержані різними методами результати, робити на їх основі коректні висновки, що демонструє системний підхід до вирішення складних задач.

У третьому розділі дисертації здобувачка Гапонова О.П. зосереджується на дослідженні особливостей проходження процесів при електроіскровому легуванні. Показано, що при використанні технології ЕІЛ в залежності від технологічних умов можна отримувати два типи модифікованих поверхонь на катоді. В залежності від природи анода, можливе формування тільки дифузійних шарів (без масоперенесення) і покриттів (з масоперенесенням).

Дифузійні шари (без масоперенесення) методом ЕІЛ можна формувати, застосовуючи спеціальні технологічні середовища регульованого складу, які наносять на катод у вигляді гелів, паст та обмазок. При цьому, залежно від складу СТС, можна формувати тільки

дифузійні шари, коли у вигляді анода використовують графіт (вуглець) і вводять до складу СТС такі легуючі елементи як вуглець, азот, сірка та ін. крім елементів металів. При цьому, змінений шар буде складатися з дифузійної зони різного хімічного і фазового складу залежно від коефіцієнтів дифузії дифундувальних елементів і основи, а глибина шару буде залежати від обраних енергетичних параметрів ЕІЛ. Прикладом отримання дифузійних (без масоперенесення) шарів може бути цементация, здійснювана методом ЕІЛ (ЦЕІЛ), коли у вигляді анода застосовують електрод-інструмент з графіту. Для підвищення якості ЦЕІЛ (збільшення товщини, суцільності та мікротвердості формованого шару), після нанесення першого шару на цементовану поверхню наносять СТС, що складається з порошку графіту і продовжують легування графітовим електродом.

Дифузійні процеси призводять до зміни хімічного складу і структури поверхневого шару металу з утворенням дифузійного шару, що складається з однієї або декількох фаз. При дифузійному насиченні протікає як об'ємна дифузія, так і дифузія по межах зерен. Показано, що основними параметрами, які регулюють ріст шару в умовах електроіскрового розряду, є щільність електричного струму і тривалість процесу.

При ЕІЛ з масоперенесенням матеріалу анода в поверхню підкладки, або/і матеріалу СТС, що складається з порошків металів, структура отриманих покриттів буде складатися з трьох ділянок: «білий шар», дифузійна зона і основний метал. Особливістю даного процесу є те, що в якості матеріалу анода застосовуються метали і сплави.

В умовах ЕІЛ з масоперенесенням матеріалу анода покриття формуються з використанням металевих анодів-інструментів. Авторка показала, як у випадку алітування з використанням СТС, що складається з алюмінієвої пудри та вазеліну, з подальшим ЕІЛ алюмінієвим електродом було збільшено товщину зміцненого шару та покращено суцільність покриття.

Гапоною О.П. запропонована математична модель процесу втрати маси оброблюваних поверхонь при випробуваннях на жаростійкість, що дозволяє за кількістю теплоти, що витрачається на нагрівання і витримку при температурі випробування, визначити втрати маси поверхні.

Четвертий розділ дисертації Гапонової О.П. присвячено дослідженню структури і фазового складу **однокомпонентних** модифікованих сталевих поверхонь. Приведено результати вивчення алітованих, цементованих, сульфидованих та азотованих модифікованих шарів, отриманих методами ЕІЛ з застосуванням СТС.

Структура розділу побудована таким чином, що детально вивчено технологічні, структурно-фазові та функціональні особливості для кожного типу зміцнення поверхонь сталевих зразків.

Для **алітованих** поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ показано, що мікроструктура складається з 3-х зон, а саме «білого шару», перехідної або дифузійної зони та основного металу, що має феритну-перлітну структуру. Авторка показала, що розміри зон мікроструктури суттєво залежні від енергії розряду. При низьких режимах ЕІЛ ($W_p = 0,52$ Дж) формується тонкий шар перехідної зони товщиною 20-30 мкм, суцільність якої прагне до 100 %. Зі збільшенням енергії розряду товщина «білого шару» і перехідної зони збільшується. При $W_p = 4,6$ Дж товщина «білого шару» і перехідної зони 50-70 мкм. З посиленням режиму ЕІЛ збільшується суцільність поверхневого шару. Так, при $W_p = 2,6$ Дж суцільність дифузійного шару прагне до 100 %, а «білого» шару до 85 %.

Результати дюрOMETричного аналізу розподілу мікротвердості алітованих покриттів показали, що максимальна твердість 7,2 ГПа досягається на поверхні і плавно знижується до мікротвердості основи 1,6–1,7 ГПа. Мікротвердість зон покриття визначається енергетичними параметрами процесу ЕІЛ: чим більша енергія розряду, тим більш високу

твердість має «білий шар» і, відповідно, перехідна зона. Така зміна мікротвердості обумовлюється дифузією алюмінію в підкладку, зміною структурно-фазового складу шару.

Рентгеноструктурний аналіз алітованих поверхневих шарів показав наявність в модифікованих шарах оксиду алюмінію та інтерметаліду Fe_4Al_{13} , сприяє збільшенню твердості покриття.

Окрім цього дисертанткою Гапоною О.П. для зниження шорсткості поверхні після ЕЛ алюмінієвим електродом (яка суттєво зростає з збільшенням енергії розряду) запропоновано проводити подальшу обробку цим же електродом (алюмінієм), але на менших режимах. При цьому електричний розряд протікає між вершиною виступу шорсткості і алюмінієвим електродом, в результаті чого вершина виступу руйнується і знижується величина шорсткості поверхні.

В дисертаційній роботі проведено дослідження жаростійкості алітованих покриттів, отриманих за класичною технологією (в розплаві алюмінію) і ЕЛ алюмінієвим електродом. Показано, що електроіскрові покриття характеризуються високою жаростійкістю. Металографічний аналіз характеру окиснення зразків після випробування на жаростійкість свідчить про те, що після випробування основний метал окиснюється, про що свідчить наявність оксидів в поверхневому шарі. Особливо інтенсивно окислюються зразки без захисного покриття. Алітовані покриття, отримані методом ЕЛ, зберігають підвищену твердість, захищають від окиснення основний метал, про що свідчить менший вміст оксидів в при поверхневому шарі основного металу і достатня твердість покриття. Результати дослідження дають можливість рекомендувати технологію ЕЛ алюмінієвим електродом з метою підвищення стійкості сталі до окиснення при підвищених температурах.

Також здобувачкою розроблено технологію формування **цементованих** поверхневих шарів, отриманих методом ЕЛ. Для досліджень використовували дві серії зразків.

У першій серії зразки обробляли за традиційною технологією – на одному режимі і з однаковою продуктивністю при ЦЕЛ компактним електродом-інструментом.

У другій серії зразки обробляли поетапно:

- на першому етапі здійснювали ЦЕЛ поверхні зразка компактним електродом-інструментом, відповідно до обраної енергії розряду і з продуктивністю $1 \text{ см}^2/\text{хв}$;
- на другому етапі на сформовану на першому етапі поверхню деталі наносили порошок графіту у вигляді суспензії, у графіту і вазеліну.
- на третьому етапі, не чекаючи висихання, проводили ЦЕЛ компактним електродом-інструментом, сформованої на другому етапі поверхні, причому на тому ж режимі і з такою ж продуктивністю, як на першому етапі.

Результати дюрOMETричних досліджень свідчать про те, що максимальна мікротвердість визначається на зразках після традиційного ЦЕЛ, оброблених при енергії розряду $W_p = 4,6 \text{ Дж}$ складає – 8,5 ГПа, а використання запропонованої технології дозволяє підвищити мікротвердість до 10,8 ГПа на сталі 20 і до 11,8 на сталі 40Х.

Порівнюючи вплив традиційної та досліджуваної технологій ЦЕЛ на якісні параметри поверхневого шару необхідно відзначити, що після обробки поверхні за пропонованою технологією ЦЕЛ зменшується шорсткість поверхні. Так, після традиційної ЦЕЛ при $W_p = 4,6 \text{ Дж}$ шорсткість поверхні складає $R_a = 8,3-9,0 \text{ мкм}$, а після пропонованої – $R_a = 3,2-4,8 \text{ мкм}$.

Досліджено вплив пропонованої технології ЕЛ на кількість вуглецю в цементованому шарі. На поверхні формується шар з вмістом вуглецю до 0,86 %. У приповерхневому шарі покриття формуються невелика кількість ділянок у вигляді пор, в яких міститься графіт. Очевидно, вільний графіт буде позитивно пливати на антифрикційні властивості оброблених поверхонь під час тертя.

В дисертаційній роботі Гапонової О.П. запропановано технологію *сульфідуювання* зразків зі сталі і високоміцного чавуну ВЧ60 спеціальним електродом з нержавіючої сталі використанням СТС. Показано, що глибина сульфідованого шару на сталі 20 та високоміцному чавуні ВЧ60, в залежності від енергії розряду, коливається в межах 10-100 мкм, а вміст сірки відповідно 0,05-0,4мас.%. Шорсткість сульфідованої поверхні на сталі змінюється в діапазоні $Ra=0,7-13,7$ мкм, а для чавуну $Ra=0,8-14,6$ мкм.

З огляду на те, що метод сульфідуювання застосовується для усунення схоплювання деталей в парах тертя, то для зниження їх шорсткості поверхні доцільно застосовувати:

- при сульфідуюванні з енергією розряду $W_p < 0,55$ Дж – метод безбразивної ультразвукової фінішної обробки;

- при сульфідуюванні з енергією розряду $W_p = 0,55-1,7$ Дж – метод шліфування. При цьому товщина сульфідованого шару буде знижуватися на 50 мкм.

Запропоновано новий спосіб *азотування та нітроцементзації* методом ЕІЛ. Аналіз особливостей структуроутворення поверхневих шарів вуглецевих сталей після азотування та нітроцементзації методом ЕІЛ показав, що структура шару складається з трьох ділянок: «білого» шару, дифузійної зони і основного металу. Зі збільшенням енергії розряду зростають такі якісні параметри поверхневого шару, як товщина, мікротвердість «білого» шару і дифузійної зони, шорсткість. Суцільність «білого» шару при $W_p = 0,13$ Дж складає 80%, при подальшому збільшенні енергії розряду зростає і при $W_p = 3,4$ Дж становить 100%. Порівняльний аналіз впливу підкладки на якісні параметри поверхневого шару при азотуванні та нітроцементзації методом ЕІЛ показав, що при заміні сталі 20 на сталь 40 збільшується шорсткість поверхневого шару, товщина «білого» шару і перехідної зони, тобто глибина зони підвищеної твердості, а також величина її мікротвердості.

П'ятий розділ дисертації Гапонової О.П. присвячено питанням дослідження інтегрованих технологічних процесів, при створенні багатокомпонентних покриттів методом ЕІЛ з використанням комплексного СТС. В цьому розділі вивчено особливості структурно-фазового формування властивості комбінованих покриттів, отриманих методами ЕІЛ а саме:

- сульфоцементовані покриття;
- сульфоалітовані покриття;
- покриття системи Al-C-S;
- покриття системи Al-C-B;
- сульфомолібденові покриття;
- квазібагатошарові покриття.

Створення *сульфоцементованих* покриттів є перспективним з точки зору поліпшення твердості та зносостійкості, а також забезпечення спеціальних триботехнічних властивостей поверхонь деталей.

ДюрOMETричні дослідження сульфoцементованих покриттів свідчать про те, що в поверхневому шарі утворюються дві зони: у приповерхневому шарі –зона зниженої мікротвердості 1,4-1,6 ГПа, далі розташована зона підвищеної мікротвердості 1,8-2,2ГПа. Авторкою дисертації виявлено, що зі збільшенням енергії розряду твердість і глибина шару зниженої мікротвердості та зміцненого шару збільшуються. Така особливість формування сульфoцементованого шару, отриманого методом ЕІЛ, пов'язана з різною дифузійною вуглецю та сірки вглиб металу.

Методом мікрорентгеноспектрального аналізу сульфoцементованих покриттів встановлено, що зі збільшенням енергії розряду спостерігається зменшення кількості сірки, що, очевидно, пов'язано з вигоранням сірки при протіканні імпульсного розряду в процесі ЕІЛ. Крім того, підвищений вміст сірки виявляється в місцях пор, що пояснюється скупченням сірковмісної речовини на цих ділянках. Сірка накопичується в поверхні металу

на глибині до 30 мкм, її концентрація на цій відстані становить близько 0,4%. При ЕІЛ графітовим електродом вуглець дифундує вглиб металу і на відстані 30-50 мкм від поверхні формується зміцнений шар з мікротвердістю близько 2 ГПа.

Сульфоалітування Гапонова О.П. проводила методом ЕІЛ, який полягав у нанесенні на зразки консистентної речовини, що містить сірку, і легування алюмінієвим електродом.

Проведений металографічний і дюрOMETричний аналізи свідчать про те, що на мікроструктурах можна виділити три зони: приповерхневий, не суцільний пухкий шар, товщиною 10-100 мкм і мікротвердістю 1,4-2,1 ГПа, «білий» зміцнений шар товщиною 20-40 мкм і мікротвердістю 4,1-5,2 ГПа, дифузійна зона й основний метал з ферито-перлітною структурою. Необхідно відзначити, що зі зростанням енергії розряду збільшуються параметри шару: товщина, мікротвердість верхнього і білого шару, а також їх суцільність. Електронно-мікроскопічні підтвердили, що при сульфоалітуванні методом ЕІЛ утворюються якісні шари високої суцільності. Найбільша кількість сірки знаходиться у поверхневому шарі, що характеризує шар зниженої мікротвердості і розподіляється по глибині до 10 мкм. Дифузійна зона алюмінію складає 30-80 мкм, залежно від енергетичних параметрів процесу ЕІЛ. Необхідно відзначити, що найбільший вміст алюмінію характерний для ділянок покриття, що знаходяться на відстані 7-15 мкм від поверхні. Отже, приповерхневий «м'який» шар збагачений сіркою, зміцнений – алюмінієм.

З метою створення товстошарових покриттів Гапоновою О.П. запропоновано технологію сульфоалітування методом ЕІЛ за схемою: змішування сірчаної мазі й алюмінієвої пудри у відношенні 33,3% S і 56% Al (вагові %), ЕІЛ алюмінієвим електродом при $W_p = 6,8$ Дж. Характерною особливістю структури, сформованої поверхні, є масивний «білий» шар, товщина якого на окремих ділянках складає від 160 до 200 мкм. Мікротвердість на поверхні становить близько 5 ГПа. Від поверхні до основи мікротвердість плавно знижується і на глибині 170 мкм переходить в мікротвердість основи (1,7ГПа).

Аналіз профілів поверхонь зразків після сульфоалітування методом ЕІЛ свідчить про те, що збільшення енергії розряду не приводить до значного зміцнення поверхневого шару – мікротвердість зміцненого шару на сталі 20 при $W_p = 3,4$ Дж становить 7,2 ГПа, а при $W_p = 6,8$ Дж – близько 5 ГПа і товщина шару збільшується з 80 до 200 мкм. Однак із посиленням енергетичного впливу при ЕІЛ збільшується шорсткість поверхні. Таким чином, з метою отримання товстошарових сульфоалітуваних покриттів дисертанткою Гапоновою О.П. рекомендовано впроваджувати запропоновану технологію.

Використання в якості легуючого електроду графіт в середовищі консистентної речовини 33,3% S + 56% Al дозволяє отримувати **покриття системи Al-C-S**. У поверхневому шарі таких покриттів спостерігається утворення окремих лунок, глибина і діаметр яких залежать від параметрів електроіскрового впливу. Іскровий розряд супроводжується виділенням тепла, швидкість наростання температури становить 105 °C / сек, що характерно тільки для вибухових процесів. При таких умовах близько 25% об'єму металу набуває температуру кипіння, миттєві тиски на поверхні досягають сотень тисяч атмосфер, що призводить до утворення лунок.

На зразку сталі 20 з покриттями Al-C-S в області кратера виявлено три зони. Перша зона – складається зі стовпчастих кристалів, велика швидкість кристалізації визначила анізотропію росту кристалів, тобто прискорене зростання головних осей дендритів, орієнтованих у напрямку відводу тепла. Товщина шару стовпчастих кристалів на бічній поверхні зростає від дна до виходу лунки. Друга – перехідна зона прилягає до першої, складається із зерен складної форми – зона термічного впливу. Третя – зона вихідного металу прилягає до перших двох, має вихідну структуру.

Товщина білого шару таких покриттів коливається в межах 60-180 мкм в залежності від енергії розряду. Суцільність білого шару складає 50-90%, шорсткість поверхні R_{\max} 8,9- 62,4, а мікротвердість білого шару дорівнює 9-9,5 ГПа. При одночасному насиченні сталі вуглецем, сіркою і алюмінієм, методом ЕІЛ при значному збільшенні енергії розряду (з 0,52 до 6,8 Дж) відбувається зростання шорсткості поверхні і зменшення суцільності покриття.

Наявність у консистентній речовині сірки сприяє процесу сульфідуювання. У таблиці 5.11 представлена зміна вмісту сірки за глибиною від поверхні сталі 20 після ЕІЛ з енергією розряду 6,80 Дж. Так, на поверхні кількість сірки максимальна і складає 0,21% і поступово зменшується до 0,03% при відстані від поверхні на глибині 160 мкм.

Дисертанткою Гапоною О.П. розроблено технологію нанесення та проведено оцінку якості **покриттів системи Al-C-B**, отриманих методами ЕІЛ, алюмінієвим електродом. Мікроструктура Al-C-B покриттів складається з декількох ділянок, кількість і параметри яких визначаються енергетичними режимами процесу ЕІЛ. При відносно невисоких енергіях розряду (0,13 і 0,55 Дж) шари складаються з 3-х ділянок – верхній «білий» зміцнений шар, дифузійна зона і основний метал – сталь 40 з ферито-перлітною структурою. При цьому, величина «білого» шару для цих режимів становить 15-20 мкм. Збільшення енергії розряду до 4,9 Дж призводить до зміни кількості ділянок та їх структури: верхній шар з дендритною структурою (до 60 мкм), прошарок (до 20 мкм), дифузійна зона, що характеризується подрібненими структурними складовими. Мікрорентгеноспектральний аналіз отриманих покриттів свідчить про те, що при електроіскровому легуванні відбувається насичення поверхневих шарів алюмінієм, бором і вуглецем. Зі збільшенням енергії розряду дифузійна зона збільшується. Так, при ЕІЛ з $W_p = 0,13$ Дж сталі 40 дифузійна зона складає 10-15 мкм. ДюрOMETричні дослідження показали, що з посиленням енергетичного впливу при ЕІЛ збільшується мікротвердість як верхнього зміцненого шару, так і дифузійної зони. Так, при $W_p = 0,13$ Дж $H_m = 6,5$ ГПа, а при $W_p = 4,9$ Дж – 12,4 ГПа.

В дисертаційній роботі здобувачка запропонувала спосіб **сульфомолібденування** металевих поверхонь, що полягає в нанесенні консистентної речовини, що містить сірку, і електроіскрове легування молібденовим електродом. Сульфомолібденові покриття складаються з 4-х зон: верхній пухкий шар з мікротвердістю $H_m = 1,1-2$ ГПа, «білий» зміцнений шар з $H_m = 5,2-5,5$ ГПа для $W_p = 0,13$ Дж і $H_m = 10,6$ ГПа для $W_p = 3,4$ Дж, дифузійна зона і основний метал.

Дисертанткою Гапоною О.П. показано, що високі швидкості нагрівання і охолодження мікрооб'ємів поверхневого шару, призводять до термомеханічного зміцнення, що впливають на фазоутворення в поверхневому шарі і при температурі легування (більше 1000 ° С) утворюється два легованих аустеніту. Один з них при охолодженні зазнає мартенситного перетворення, при цьому утворюється мартенсит з параметром ґратки $a = 2,8740$ нм, $c = 2,9200$ нм. У зв'язку з тим, що молібден інтенсивно знижує температури мартенситного перетворення, воно не відбувається до кінця, і в покритті залишається не перетвореним залишковий аустеніт – твердий розчин ГЦК. Крім твердих розчинів в поверхневому шарі утворюється до 40% інтерметалідів FeMo, що сприяє помітному збільшенню мікротвердості поверхневого шару після ЕІЛ (при $W_p = 0,13$ Дж – $H_m = 5,5$ ГПа, при $W_p = 0,55$ Дж – $H_m = 7,8$ ГПа).

В дисертаційній роботі О.П.Гапоною приділено увагу до отримання методом електроіскрового легування **квазібагатошарових зміцнених шарів**. Комплексні покриття на сталі 12Х18Н10Т шляхом легування здійснювали в такій послідовності:

- ЦЕІЛ при $W_p = 3,4$ Дж + алітування алюмінієвим електродом марки СвА99 при $W_p = 3,4$ Дж;

- ЦЕЛ при $W_p = 3,4$ Дж + ЕЛ твердим сплавом Т15К6 при $W_p = 3,4$ Дж;
- ЦЕЛ при $W_p = 3,4$ Дж + алітування алюмінієвим електродом марки СвА99 при $W_p = 3,4$ Дж + ЕЛ твердим сплавом Т15К6 при $W_p = 3,4$ Дж.

Металографічний аналіз отриманих покриттів показав, що мікроструктура складається з 3-х зон: зміцнений шар, дифузійна зона і основний метал, що має аустенитну структуру. Зміцнений шар нерівномірний за величиною, і становить 90-160 мкм.

ДюрOMETричні дослідження показали, що шар після ЦЕЛ має підвищену твердість 9-9,5 ГПа. В середньому глибина шару підвищеної твердості становить ~ 100 мкм.

Зміцнений шар покриття, отриманого в послідовності ЦЕЛ→ЕЛ Al, має мікротвердість до 7,5 ГПа, його товщина 80 – 120 мкм і складається з двох твердих розчинів з ОЦК і ГЦК ґратками, інтерметалевої сполуки (Fe_4Al_{13}) і двох карбідів з гексагональною ($(Cr, Fe)_7C_3$ і кубічною ($AlFe_3C$) кристалічною ґраткою.

Покриття, сформовані в послідовності ЦЕЛ → ЕЛ Al → ЕЛ Т15К6 мають найбільшу зону підвищеної твердості (320-360 мкм) і найменшу шорсткість поверхні (7,5 мкм). За рахунок утворення в покритті 62% (мас.) TiC та інтерметалідів забезпечується отримання максимальної мікротвердості поверхневого шару (більше 11,5 ГПа). ЕЛ за описаною технологією дозволяє збільшити дифузійну зону вуглецю й алюмінію, підвищити твердість і товщину зміцненого шару.

Представлений дисертанткою аналіз результатів показує, що розділи 4 і 5 дисертації Гапонової О.П. займає одну з ключових позицій з погляду не тільки наукової цінності доробку авторки, але і з точки зору рекомендацій виробникам та розробникам нових ефективних технологій.

У шостому розділі дисертації здобувачка Гапонова О.П. присвятила узагальненню технологічних, якісних та функціональних особливостей запропонованої схеми зміцнення робочих поверхонь деталей ДО шляхом ЕД+СТС.

В цьому розділі розглянуті наступні питання:

- Результати дослідження впливу способів підвищення якості робочих поверхонь на їх механічні властивості;
- Результати порівняльних трибологічних випробувань поверхонь ковзання, оброблених методом ЕЛ;
- Управління якістю поверхневих шарів, отриманих методом ЕЛ із застосуванням СТС;
- Статистичний та кінетичний аналіз процесу конденсації речовини при ЕЛ із застосуванням СТС, шляхом побудови фазових портретів;
- Підвищення якості робочих поверхонь деталей ДО.

Результати дослідження впливу способів підвищення якості робочих поверхонь на їх механічні властивості.

Результати механічних випробувань зразків із покриттями, отриманими методом ЕЛ з використанням СТС показали, що формування покриттів на підкладках зі сталі 20, 40, 38Х2МЮА, 12Х18Н10Т, 30Х13 супроводжується зниженням на 4-5% меж міцності й текучості відповідно. Водночас характеристики пластичності (відносне подовження та відносне звуження) зростають. Застосування методу БУФО як завершальної операції після ЕЛ підвищує характеристики міцності для різних сталей від 7 до 18%.

Результати порівняльних триботехнічних випробувань поверхонь ковзання, оброблених методом ЕЛ.

Проведені порівняльні триботехнічні випробування покриттів, отриманих методом ЕЛ з використанням СТС, показали, що високу зносостійкість мають покриття систем Al + C + B Mo + S. 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 легової 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.

Управління якістю поверхневих шарів, отриманих методом ЕІЛ із застосуванням СТС.

Виявлено 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: товщини h , мікротвердості H_{μ} , шорсткості R_a відповідно й суцільності поверхневого шару S . Це дозволяє 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.

Статистичний та кінетичний аналіз процесу конденсації речовини при ЕІЛ із застосуванням СТС, шляхом побудови фазових портретів.

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 (сталева 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 металева поверхня значно нагрівається, 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.

Підвищення якості робочих поверхонь деталей ДО

В даному підрозділі здобувачка Гапонова О.П. наводить конкретні робочі деталі ДО, зміцнені за технологією ЕІЛ+СТС, які було успішно впроваджено в виробництво. Дозволю собі зупинитися на переліку цих деталей: шийки валів, деталі масляних ущільнень, колеса відцентрового компресору вал-шестерні компресорної установки К-104 «ВАВЕТТА», прес-форми для формування виробів з полімерних композиційних матеріалів та інші.

Встановлений автором дисертації фактаж переконує у важливості отриманих результатів і висновків не тільки у науковому, але й у прикладному плані, що дозволяє позитивно охарактеризувати здобувачку Гапонову О.П. як ретельного науковця, яка чітко окреслює та успішно вирішує найскладніші наукові завдання і реалізує їх на практиці.

Мені видається, що наведені у даному розділі дисертації результати ілюструють такий важливий і невід’ємний бік роботи, як реальну можливість інженерної реалізації напрацьовань здобувачки Гапонової О.П.

У **додатках** до дисертації, що рецензується, представлено затверджену технічну документацію, яка підтверджує застосування наукових напрацювань на практиці, це – ТОВ «ТРІЗ», м. Суми, АТ «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання», ПАТ «Сумихімпром», КП «Міськводоканал», АТ «Сумський завод насосного та енергетичного машинобудування «НАСОСЕНЕРГОМАШ», ТОВ «Науково-впровадницьке підприємство СУМИПЛАСТПОЛІМЕР» (2020 р.), кафедри 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.

Зауваження по дисертаційній роботі

Окрім викладених вище позитивних якостей рецензованої дисертації Гапонової О.П. слід зробити наступні зауваження по роботі:

1. У рубриці «Актуальність теми» дисертації і у авторефераті відсутнє чітке і стисле формулювання конкретної науково-технічної проблеми, на вирішення якої спрямована робота, як це вимагають нормативні документи з питань підготовки та експертизи дисертацій.

2. На жаль, п. 1-3 рубрики «Наукова новизна отриманих результатів», сформульовано таким чином, що вони мають декларативний характер. Безумовно, це важливі положення, але їх треба розширити шляхом додавання конкретних (цифрових) результатів, які в достатній кількості приведено в дисертації.

3. Зауваження щодо структури дисертації. Підрозділи **Результати дослідження впливу способів підвищення якості робочих поверхонь на їх механічні властивості** та **Результати порівняльних трибологічних випробувань поверхонь ковзання, оброблених методом ЕІЛ** не відповідають назві Розділу 6: Промислове впровадження технологій підвищення якості деталей ДО. На мій погляд ці підрозділи за змістом було б логічним привести в розділах 4 або 5.

4. Не зрозуміло, чому окиснення в дисертаційній роботі оцінюються втратою маси зразків (рис. 4.10, стор. 217). Окиснення супроводжується утворенням оксидів, природно, призводить до збільшення маси зразків.

5. У розділі 2 дисертації (стор.125) і у авторефераті приведено методологічну схему модифікування поверхні методом ЕІЛ із застосуванням СТС. Мені здається, що було б доцільним привести спочатку фінішну обробку покриттів, а потім визначати їх властивості. Вважаю, що властивості, а саме жаростійкість, триботехнічні характеристики, які визначаються в роботі, суттєво залежать від стану поверхні.

6. Розділ 3 дисертації має назву «Термодинамічна модель формування поверхневого шару при ЕІЛ», але при розробці такої моделі не використовується жоден термодинамічний параметр.

7. У розділах 4 і 5 представлені розробки однокомпонентних (4 різновиди) та інтегрованих (6 різновидів) технологічних процесів зміцнення робочих поверхонь ДО. Доречним було б привести таблицю, або узагальнити при яких умовах, для яких поверхонь доцільно використовувати ті чи інші технологічні процеси. Кожна запропонована технологія має свої позитивні та негативні властивості, тому узагальнення такого роду дозволили б акцентувати увагу при обранні оптимальної технології.

8. При триботехнічних випробуваннях експериментально доведено, що зносостійкість покриттів на легированих сталях вищі за вуглецевих, але не приведено за рахунок чого.

Бажано вивчити особливості зношування покриттів, тому що утворення в зміцнених шарах карбідів, оксидів та інтерметалідів суттєво впливають на механізми зношування та зносостійкість.

9. Серед зауважень щодо оформлення роботи слід указати на наступні. В тексті дисертації та автореферату є невелика кількість описок, помилок та вживання небажаних словосполучень: «представляє собою», «слід відмітити», «однак», та інші. В роботі є помилкові повтори: рис. 4.16 та 5.3 з різними підписами, перший абзац на стор. 286 співпадає з абзацем на стор. 294. Не завжди авторка вказує які відсотки (масові чи атомні) вона використовує. Доречним було б вказати про це в підрозділі скорочень.

Загальні висновки по дисертації


Дисертація Гапонової О.П. є завершеною науковою працею, при виконанні якої були одержані нові науково обґрунтовані результати, що у сукупності вирішують актуальну науково-технічну проблему - підвищення зносостійкості покриттів в екстремальних умовах експлуатації

Основні результати дисертаційної роботи достатньо повно опубліковані у наукових фахових і міжнародних виданнях, що індексуються наукометричними базами даних Scopus та Web of Science, і широко апробовані на міжнародних науково-технічних конференціях.

Зміст автореферату дисертаційної роботи Гапонової О.П. є ідентичним до основних положень дисертації.

Вважаю, що дисертаційна робота «Керування властивостями поверхонь сталених деталей електроіскровим легуванням у спеціальних технологічних середовищах» повністю відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 – «Матеріалознавство» та вимогам п. 9, 10 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 №567, щодо докторських дисертацій, а її авторка – **Гапонова Оксана Петрівна** заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за означеною спеціальністю.

Офіційний опонент-
завідувач відділу матеріалознавства та інженерії
високостійких поверхневих шарів
Інституту проблем матеріалознавства
ім. І. М. Францевича НАН України,
доктор технічних наук, професор

 О.П. Уманський

Підпис доктора технічних наук,
професора О.П. Уманського засвідчую.
Учений секретар Інституту проблем матеріалознавства
ім. І. М. Францевича НАН України, к.ф.-м.н.

 В.В.Картузов

