

ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, професора

Брикова Михайла Миколайовича

на дисертаційну роботу

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 (13 – механічна інженерія)

Актуальність роботи. Знос поверхонь тертя є однією з провідних причин виходу з ладу деталей машин багатьох галузей промисловості. Високі швидкості відносного переміщення контртіл трибоспряжень, температура поверхні тертя і тиск на неї, а також додаткова дія корозії та інших несприятливих чинників висувають проблему зносостійкості і відновлення деталей машин у ланку найважливіших проблем науки і техніки.

На теперішній час поширюється використання методів відновлення поверхонь тертя деталей машин із застосуванням концентрованих потоків енергії. Особливу увагу дослідників та фахівців з відновлювання привертає технологія електроіскрового легування (ЕІЛ), яка має значні переваги у порівнянні з іншими методами. Головними перевагами ЕІЛ є: висока адгезія покриття з основою, вибірковість оброблення, відсутність небезпечного впливу на навколишнє середовище, відсутність остаточної деформації, відносно невеликі енергетичні витрати, відсутність спеціальних вимог до попереднього стану відновлюваної поверхні. ЕІЛ дозволяє створювати покриття, якість яких не поступається, а у багатьох випадках і перевищує якість покриттів, що створено за допомогою інших відомих технологій.

Технології ЕІЛ притаманні і певні недоліки, наприклад підвищена шорсткість відновленої поверхні. Їх можна знизити або повністю усунути застосуванням додаткового оброблення, або спеціального технологічного середовища (СТС). Використовуючи СТС, що містить певні легувальні

елементи, можна додатково керувати хімічним складом і структурою відновлюваних поверхонь.

Таким чином, дослідження процесів ЕІЛ із застосуванням СТС для отримання функціональних покриттів, вивчення їх структури і властивостей є актуальним для сучасного матеріалознавства.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано на кафедрі технічного сервісу Сумського національного аграрного університету (СНАУ) в рамках держбюджетної теми «Розробка енергозберігаючих технологій для забезпечення експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей» (номер держреєстрації 0116U002756, 2016-2017 р.р.); Сумському державному університеті в рамках бюджетних тем «Науково-технологічні аспекти дизайну матеріалів» (0110U001770, 2010-2014 р.р.), «Сучасні технології розробки та отримання перспективних матеріалів і формоутворення виробів машинобудівної галузі» (0114U005445, 2014-2019 р.р.), «Розроблення та дослідження властивостей нових функціональних матеріалів» (0120U101433, 2019-2024 р.р.), «KVP Welding Technologies» (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» (0120U102004, 2020-2023 р.р.) та низки госпдоговорів, які було виконано за участі авторки.

Наукове і практичне значення отриманих результатів. Дисертація Гапонової О.П. є завершеною науковою роботою, актуальність якої не викликає сумнівів. Дисертація характеризується єдністю змісту, логічністю викладення, має наукову новизну та практичну значущість, що свідчить про особистий внесок здобувача в науку. В результаті теоретичних та експериментальних досліджень авторкою: одержано залежності особливості формування фазового складу та структури обробленої поверхні вуглецевих сталей після нанесення однокомпонентних покриттів методом ЕІЛ з використанням СТС та показано, що після обробки підвищуються товщина

та мікротвердість робочого шару; встановлено можливість отримання за технологією ЕІЛ сульфідованих шарів на сталевих поверхнях завдяки використанню СТС, що містять сірку, графітовим електродом та електродом з металевого дроту, що забезпечує не тільки зміцнення поверхонь тертя, а також їх меншу схильність до схоплення; методом ЕІЛ+СТС проведено азотування та нітроцементацію сталевих деталей, встановлено взаємозв'язок між структурою відновленої поверхні та параметрами ЕІЛ; методом ЕІЛ+СТС проведено одночасне насичення сталеві поверхні вуглецем, сіркою і бором з утворенням в покриттях фериту, аустеніту, інтерметаліду Fe_4Al_{13} , легованого бороцементиту $Fe_3(CB)$ з підвищенням мікротвердості до 12350 МПа; дослідженням сульфомолібденових покриттів, які отримано методом ЕІЛ+СТС, встановлено наявність дісульфіду молібдену як на поверхні (до 8 мас.%), так і на глибині 15 мкм (до 5 мас.%), що значно покращує властивості поверхонь тертя; запропоновано рівняння, які пов'язують показники якості структури поверхні та її механічних властивостей від параметрів процесу ЕІЛ+СТС; набуло подальшого розвитку математичне моделювання формування покриття (метод фазової площини і статистичного аналізу).

Розробки, які висвітлено в дисертації, захищено 34 патентами, зокрема 13 на винахід, впроваджено на низці підприємств України. Економічний ефект від впровадження очікується на рівні 1,1 млн. грн.

Ступінь обґрунтованості наукових положень та висновків, сформульованих у дисертації, їх достовірність і новизна.

Викладені в дисертаційній роботі наукові положення та висновки є достовірними, науково обґрунтованими і новими, базуються на ретельно виконаних теоретичних і експериментальних дослідженнях. Вирішення завдань, які поставлено у дисертації, дозволило підвищити довговічність деталей «динамічного обладнання» шляхом керування структурою та властивостями сталевих поверхонь за рахунок комплексного впливу ЕІЛ та СТС. Експериментальні лабораторні та промислові дослідження виконано на

сучасному устаткуванні та вимірювальній апаратурі. Показники міцності, пластичності, зносостійкості та жаростійкості отриманих покриттів визначено за стандартизованими методиками. Обробку результатів виконано коректно із застосуваннями загальноновживаних статистичних методів.

Наукові положення, які за результатами теоретичних і експериментальних досліджень самостійно одержано авторкою, відбито у восьми пунктах загальних висновків.

У висновку 1 обґрунтовано проведення цілеспрямованих досліджень у напрямку використання ЕІЛ в комбінації з СТС для забезпечення покриттів високої якості.

Висновок 2 надає методологію керування структурним станом сталюї поверхні після оброблення ЕІЛ, узагальнює закономірності впливу чинників процесу ЕІЛ+СТС на структурний стан обробленої поверхні що дозволяє обґрунтовано призначати матеріали і склад СТС для забезпечення найбільш економічного шляху отримання зміцненої поверхні з необхідними властивостями.

Висновок 3 визначає показники поверхневих шарів, які забезпечуються за рахунок застосування ЕІЛ з різними СТС. Доведено, що під час ЕІЛ сульфидування збільшується глибина дифузійного шару і знижується мікротвердість поверхні; зміцнення поверхневого шару забезпечується ЕІЛ цементацією, алітуванням, азотуванням; ЕІЛ алітування підвищує жаростійкість. Показано, що енергетичні параметри процесу ЕІЛ впливають на шорсткість, мікротвердість, товщину і суцільність покриттів.

Висновок 4 надає результати аналізу особливостей структуро- і фазоутворення багатокомпонентних шарів, які отримано різними методами ЕІЛ+СТС, а саме: сульфоцементациєю, сульфоалітуванням, покриттям систем Al-C-S та Al-C-B, сульфомолібденуванням і створенням квазібагатошарових покриттів. Встановлено, що в сульфоалітованих покриттях в залежності від енергії розряду утворюються інтерметаліди FeAl та FeAl₂. Завдяки введенню аморфного бору в СТС твердість покриття збільшено до 12350 МПа на сталі

40. Також наведено властивості зміцнених шарів для інших варіантів ЕІЛ+СТС обробки з різною W_p .

У висновку 5 зазначено, що на підставі експериментальних досліджень запропоновано математичні моделі, які дозволяють прогнозувати основні показники якості зміцненого шару і таким чином установлювати структуру подальшого технологічного впливу для забезпечення необхідної якості.

Висновок 6 узагальнює результати статистичного та кінетичного аналізу конденсації речовини під час ЕІЛ+СТС способом побудови фазових портретів. Встановлено, що із підвищенням потужності розряду збільшуються товщина та мікротвердість покриття.

У висновку 7 зазначено, що сірка в покритті забезпечує підвищення зносостійкості; покриття, що отримано методом ЕІЛ+СТС, підвищують зносостійкість сталей 38Х2МЮА й 12Х18Н10Т; карбонітридні покриття, що отримано ЕІЛ+СТС на сталі 38Х2МЮА, за зносостійкістю не поступаються таким, що отримано у солях дифузійним способом.

Висновок 8. Розроблено наукові принципи практичної реалізації технологій одержання покриттів методом ЕІЛ+СТС в поєднанні з іншими методами (ППД, БУФО та ін.). Нові технології, розроблені на їх підставі, захищено 34 патентами і впроваджено у виробництво із загальним економічним ефектом 1 млн 171 тис. грн.

Повнота викладення наукових положень дисертації в опублікованих роботах. За результатами роботи опубліковано в 111 наукових праць: 3 монографії у співавторстві, 33 статті у спеціалізованих наукових виданнях України, 6 статей у закордонних виданнях. 25 видань, в яких опубліковано статті авторки дисертації, індексуються у міжнародних наукометричних базах Scopus та/або Web of Science. Отримано 34 патенти, зокрема 13 на винахід, опубліковано 35 тез конференцій.

Теоретичні і експериментальні результати досліджень, що опубліковано одноосібно, отримано авторкою самостійно. У наукових працях, які опубліковано у співавторстві, особистим внеском є: встановлення

закономірностей формування структури покриттів, проведення дюрOMETричних досліджень, підготовка зразків для проведення рентгенографічних та локального рентгеноспектрального аналізу, проведення випробувань на зносостійкість і жаростійкість покриттів, обґрунтування вибору матеріалів та методів дослідження, аналіз одержаних результатів, розроблення нових підходів до побудови математичної моделі процесів ЕІЛ, розроблення математичної моделі прогнозування якості поверхневих шарів, дослідження і розроблення нових технологічних процесів моделювання і прогнозування структуроутворення та властивостей покриттів.

Мова і стиль викладення матеріалу дисертації. Дисертацію викладено державною мовою. Стиль викладення відповідає загальноприйнятним вимогам до наукових творів. Розділи роботи є взаємопов'язаними, логічно і послідовно відбивають зміст дисертації. Дисертація є закінченою науковою працею, що містить розв'язання важливої науково-практичної проблеми.

Структура і зміст дисертації. Дисертація складається з вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг становить 568 сторінок, зокрема 12 додатків на 136 сторінках. Обсяг основного тексту становить 431 сторінку, 134 рисунки, 61 таблицю. Список використаних джерел містить 359 найменувань на 47 сторінках.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і завдання, визначено об'єкт і предмет дослідження, наведено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, визначено особистий внесок автора.

У першому розділі «Проблеми підвищення якості поверхневих шарів деталей машин динамічного обладнання» проведено аналіз причин втрати працездатності різних класів деталей машин і методів їх захисту від різних видів зношування. Відзначено, що під час вибору методу відновлення поверхонь тертя необхідно віддавати перевагу найбільш економічним і екологічно безпечним методам. ЕІЛ у порівнянні з іншими відомими

технологіями відновлення повністю задовольняє вказаним вимогам; його широко використовують для здійснення цементації, металізації, нанесення твердих сплавів на поверхню. Відзначено, що перспективним і таким, що потребує всебічного дослідження, є поєднання ЕІЛ та СТС, що дозволяє значно розширити можливості метода з точки зору номенклатури елементів, якими насичують поверхню. Встановлено, що відсутні моделі, які дозволяють прогнозувати властивості покриттів, що отримано методом ЕІЛ+СТС.

Сформульовано основні завдання дисертаційної роботи та напрями їх вирішення.

У другому розділі «Методологія і методи досліджень» викладено характеристики вихідних матеріалів та спеціальних технологічних середовищ для одержання однокомпонентних і багатокомпонентних покриттів, методики теоретичних і експериментальних досліджень, наведено обладнання для ЕІЛ. Запропоновано підхід для розроблення методології створення і зміцнення робочих поверхонь деталей методом ЕІЛ.

У третьому розділі «Термодинамічна модель формування поверхневого шару при електроіскровому легуванні» розглянуто особливості перебігу дифузійних процесів під час ЕІЛ. Встановлено, що на металевих поверхнях за різних анодів утворюються дифузійні шари без масоперенесення і з масоперенесенням. Показано, що за допомогою розробленої математичної моделі з'являється можливість прогнозувати властивості поверхневих шарів. Розглянуто механізми формування і властивості шарів, що утворюються на катоді під час ЕІЛ. Також встановлено, що керування властивостями поверхневих шарів може відбуватися за рахунок СТС регульованого складу.

У четвертому розділі «Експериментальне дослідження структурно-фазового стану однокомпонентних покриттів, отриманих методом електроіскрового легування» досліджено процеси алітування, цементацію, сульфидування, азотування методом ЕІЛ+СТС. Встановлено, що застосування СТС дозволяє збільшити глибину дифузійного шару, в широких межах

керувати мікротвердістю поверхні, забезпечити підвищення його жаростійкості. Досліджено вплив енергетичних параметрів процесу ЕІЛ на характеристики отриманих покриттів для кожного з окремих процесів.

П'ятий розділ «Управління якістю поверхневих шарів деталей з використанням інтегрованих технологічних процесів, заснованих на методі електроіскрового легування» висвітлює результати досліджень багатокомпонентних покриттів, що отримано методом ЕІЛ+СТС. Досліджено процеси сульфоцементації, сульфо-алітування, нанесення покриттів систем Al-S та Al-C-B, сульфомолібденових і квазі-багатошарових зміцнених покриттів. Встановлено, що покриття із сіркою містять м'який шар, який сприяє припрацьовуванню поверхонь тертя, і зміцнений, який забезпечує високу зносостійкість. Для кожного з окремих процесів досліджено вплив енергетичних параметрів ЕІЛ на структуру і властивості отриманих покриттів.

У шостому розділі «Промислове впровадження технологій підвищення якості деталей динамічного обладнання» наведено відомості щодо промислового впровадження результатів досліджень. Визначено залежності характеристик поверхневих шарів, які отримано методом ЕІЛ+СТС, від технологічних параметрів процесу. Це дозволило розробити загальні підходи до вибору технології керування якістю покриттів. Проведено статистичний аналіз процесу конденсації речовини під час ЕІЛ+СТС методом побудови фазових портретів. Визначено, що з підвищенням потужності розряду збільшується товщина і мікротвердість зон покриття. Розроблено нові технологічні процеси відновлення і зміцнення деталей, які працюють в умовах зношування з динамічним навантаженням. Розроблені технології ЕІЛ з використанням СТС впроваджено на низці промислових підприємств держави з економічним ефектом 1,171 млн. грн.

Зауваження до роботи.

1. Термін «Динамічне обладнання» здається не дуже вдалим.

2. Не можу погодитись з тим, що під час цементації не відбувається масопереносу. Адже вуглець, яким насичується поверхня, володіє певною масою.
3. Індентування під час вимірювання мікротвердості на поперечних шліфах в деяких випадках проведено занадто близько до поверхні. Це могло призвести до виникнення значних відхилень результатів вимірювань від дійсних значень мікротвердості. Зрозуміло, що саме твердість поверхні є найбільш важливою інформацією. Для отримання мікротвердості матеріалу на поверхні можливо проводити індентування поверхні зверху безпосередньо після операції ЕІЛ без будь-якого подальшого шліфування, полірування і т.і. Звісно, шорсткість поверхні утруднює вимірювання. Але завжди можна знайти на поверхні ділянку достатньої якості і площини для проведення принаймні одного індентування в даному місці.
4. В дисертації зустрічаються абзаци тільки з одним реченням.
5. Ймовірно, кількість абревіатур є дещо перебільшеною.
6. Твердження про зношування шийок підшипників в режимі абразивного зношування викликає сумнів.
7. Термін «щільність потужності» (стор. 80), ймовірно, потребує перегляду.
8. Скорочення у списку скорочень та умовних позначок розташовано не за алфавітом. Це утруднює пошук окремих скорочень. Абревіатура «МПМ» (стор. 109) у списку відсутня.
9. Слово «інваріантний» зазвичай використовується у значенні «такий, що не має варіантів, постійний», але на стор. 117 це слово використано в протилежному значенні.
10. Рисунки 3.1 і подібні, ймовірно, доцільно назвати «Схема залежності...».
11. На стор. 189 згадуються результати досліджень Ландау-Халатникова, але посилань немає.

12. В тексті підрозділу 3.3 недостатню увагу приділено зв'язку матеріалу підрозділу із темою дисертації.

13. Не визначено термін «суцільність шару» (стор. 207 та ін.).

14. Взагалі оформлення дисертації і автореферату складає позитивне враження. Але присутні незначні неточності і друкарські похибки.

Висновок по дисертації. Дисертація Гапонової Оксани Петрівни на тему «Керування властивостями поверхонь сталених деталей електроіскровим легуванням у спеціальних технологічних середовищах» є завершеним актуальним науковим дослідженням, яке розв'язує важливу науково-прикладну проблему підвищення довговічності деталей обладнання, що зазнає зносу і динамічних навантажень, шляхом керування складом, структурою та властивостями сталених поверхонь електроіскровим легуванням через спеціальні технологічні середовища. Тема дисертації і її зміст відповідають спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство (13 – механічна інженерія). За актуальністю, новизною, обґрунтованістю наукових положень і практичних результатів, ступенем апробації результатів досліджень дисертація відповідає чинним нормативним вимогам до дисертацій доктора наук, зокрема п.п. 9, 10, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою КМУ №567 від 24.07.2013 (зі змінами). Вважаю, що **Гапонова Оксана Петрівна** заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство (13 – механічна інженерія).

Офіційний опонент

Доктор технічних наук, професор



М.М.Бриков

Підпис М.М.Брикова засвідчую

Учений секретар

канд. соц.наук, доцент



В.В.Кузьмін