

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

АГЄЄВ МАКСИМ СЕРГІЙОВИЧ



УДК 629.424.3:621.436:004.58

**НАУКОВІ ОСНОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЗАСОБІВ
ТРАНСПОРТУ ТА ЇХ ЕЛЕМЕНТІВ ВИКОРИСТАННЯМ
БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ В ПРОЦЕСІ РЕМОНТУ**

Спеціальність 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Херсонській державній морській академії Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Грицук Ігор Валерійович,
Херсонська державна морська академія,
професор кафедри експлуатації
суднових енергетичних установок

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Полянський Олександр Сергійович,
Харківський національний автомобільно – дорожній
університет, професор кафедри технології
машинобудування і ремонту машин;

доктор технічних наук, професор
Біліченко Віктор Вікторович
Вінницький національний технічний
університет, ректор;

доктор технічних наук, професор
Пузир Володимир Григорович,
Український державний університет
залізничного транспорту, завідувач
кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу.

Захист відбудеться «15» вересня 2021 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.059.02 при Харківському національному автомобільно – дорожньому університеті за адресою: 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Харківського національного автомобільно-дорожнього університету за адресою: 61002, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Автореферат розісланий «10» серпня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.П. Смирнов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Сучасні засоби транспорту (ЗТ) та їх елементи в процесі експлуатації піддаються впливу механічних, кліматичних, і інших чинників, відчуваючи при цьому вплив агресивних середовищ, тертя, вібрацій, ударів, що приводить до руйнівних процесів. В зв'язку з цим, науково-обґрунтований пошук, розробка і впровадження високопродуктивних, простих в експлуатації, наукомістких технологій відновлення деталей ЗТ в поєднанні з використанням найбільш доступних і дешевих матеріалів для досягнення високих показників надійності елементів ЗТ є актуальною науковою задачею.

Виконана статистична обробка даних показує, що середній вік вантажних автомобілів в Україні становить майже 20 років, при цьому 63 % вантажівок старше 10 років, а 42,8 % транспортних суден мають вік від 21 до 31 року, 25,1 % від 31 до 40 років. Тому щорічно ремонтні підприємства витрачають більше 40 % всього споживаного металу на виготовлення запасних деталей, а в шихту здається до 300 тис. деталей при зносі поверхонь, що сполучаються, 0,5 – 2,0 мм і втрати маси до 3,5 %.

Вирішення цієї проблеми вимагає впровадження в практику зміцнення, відновлення і підвищення надійності ЗТ та їх елементів нових і вдосконалення існуючих процесів ремонту, що базуються на наукових дослідженнях в області нанесення багатофункціональних покриттів. З метою забезпечення надійності ЗТ та їх елементів в процесі ремонту використанням багатофункціональних покриттів доцільно шляхом синтезу багатоопераційних технологій застосовувати комбіновані способи. У такій ситуації має значення правильний вибір досить простих і доступних способів нанесення багатофункціональних покриттів, які в результаті синтезу увійдуть до складу комбінованого способу і забезпечать підвищення ресурсу ЗТ та їх елементів, екологічну чистоту виробництва.

Тому, розробка і впровадження багатофункціональних покриттів отриманих комбінованим способом, що базуються на наукових дослідженнях в області відновлення та зміцнення зношених деталей для підвищення ресурсу ЗТ, спрямованих на зменшення матеріально-технічного ресурсу, скорочення поставок запасних частин імпортного виробництва є актуальною науковою проблемою при забезпеченні надійності ЗТ та їх елементів в процесі ремонту.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася на кафедрі «Експлуатація суднових енергетичних установок» (ЕСЕУ) Херсонської державної морської академії (ХДМА) згідно з планом науково-технічної діяльності академії, в рамках науково-дослідної роботи за темою: «Підвищення експлуатаційних властивостей і відновлення суднових машин і механізмів багатофункціональними покриттями» (№0114U003656, договір № Ф25/617 – 2017 від 03.10.2017 р. згідно наказу МОН №720 від 01.09.17 р.). Дисертаційні дослідження проводилися в інтересах спільної науково-дослідної роботи кафедри ЕСЕУ ХДМА і лабораторії 7.1 «Зміцнення поверхні елементів конструкцій» Інституту проблем міцності імені Г.С. Писаренко НАН України (ІПМіц) за темами: «Аналіз, класифікація методів і обґрунтування можливості використання ремонтних технологій для відновлення працездатності елементів

конструкцій на різних стадіях пошкодження» (договір № P8.10); «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» (номер держ. реєстрації №0113U002676); «Розробка науково-обґрунтованих підходів вибору оптимальних параметрів інтегрованих технологій зміцнення поверхонь деталей об'єктів техніки за критеріями адгезійної міцності» (шифр: 1.3.4.1971).

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає в забезпеченні надійності деталей засобів транспорту та їх елементів в процесі ремонту шляхом використання багатофункціональних покриттів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз і синтезувати дані про основні види зношування деталей засобів транспорту та їх елементів, способів забезпечення їх надійності та класифікувати сполучення, що зношуються;

- обґрунтувати критерії, принципи та розробити концепцію ремонту шляхом використання багатофункціональних покриттів комбінованим способом (електроіскрове легування, електродугове напилення та імпульсне іонне азотування) для забезпечення надійності засобів транспорту та їх елементів;

- розробити методи управління ресурсом засобів транспорту на основі визначення впливу параметрів комбінованого методу нанесення багатофункціональних покриттів на якість відновлених робочих поверхонь елементів засобів транспорту;

- визначити вплив режимів азотування поверхонь, відновлених напиленими покриттями, на їх мікротвердість і зносостійкість та встановити залежності лінійного та вагового зносу багатофункціональних покриттів від шляху сухого тертя;

- розробити раціональні методи реалізації відновлення зношених поверхонь, визначити оптимальні режими відновлення, встановити залежності показників якості поверхонь, відновлених комбінованим способом нанесення багатофункціональних покриттів (мікротвердість, лінійний та ваговий знос, пористість, корозійну стійкість, міцність зчеплення, шорсткість);

- розробити рекомендації щодо використання комбінованого способу нанесення багатофункціональних покриттів в умовах ремонтного виробництва для забезпечення надійності засобів транспорту та їх елементів.

Об'єкт дослідження – процес відновлення працездатності засобів транспорту та їх елементів при виконанні ремонту.

Предмет дослідження – визначення раціональних параметрів багатофункціональних покриттів процесів відновлення зношених робочих поверхонь деталей при ремонті засобів транспорту.

Методи дослідження. Загальною методологією дисертації є послідовність дій встановлення структурних зв'язків між теоретичними та експериментальними дослідженнями спираючись на комплекс статистичних та математичних методів, а саме методів морфологічного аналізу, теорії множин, математичної статистики, регресійного аналізу, тощо. Адекватність математичних моделей реальних процесів виконувалась методом параметричної ідентифікації і порівнянням розрахункових результатів з отриманими експериментальними даними. Комплекс експериментальних

досліджень проводився із застосуванням статистичної обробки отриманих результатів, що базуються на теорії похибок та невизначеності вимірювань.

Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше:

- запропоновано концепцію забезпечення надійності деталей засобів транспорту в процесі їх ремонту, яка враховує структурні та морфологічні особливості відновлюваної поверхні після електроіскрової обробки, вплив параметрів електродугового напилення на якість системи «покриття – відновлювана поверхня» та модифікуючу дію імпульсного іонного азотування покриттів, що отримані напиленням;

- розроблений комбінований спосіб отримання багатофункціональних покриттів, який відрізняється від існуючих обґрунтованим сполученням електроіскрового легування, електродугового напилення і імпульсного іонного азотування. Обґрунтована доцільність методу електроіскрового легування для підвищення адгезійної міцності напилених покриттів, підтверджена необхідність електродугового напилення струменем продуктів згорання пропано – повітряної суміші для отримання щільних покриттів з високою міцністю зчеплення та їх обробка імпульсним іонним азотуванням для підвищення твердості і зносостійкості відновлюваних поверхонь, що дозволить забезпечити високі експлуатаційні властивості і надійність деталей засобів транспорту;

- визначено вплив параметрів електродугового напилення, складу горючої суміші і співвідношення газів на окислення диспергованого металу, швидкість польоту частинок та їх дисперсність і в кінцевому підсумку на фізико механічні властивості відновлених поверхонь з покриттями (пористість, мікротвердість, адгезійну і когезійну міцність, триботехнічні характеристики і корозійну стійкість);

- отримано залежності параметрів процесу електродугового напилення, що дозволяють визначити його раціональні режими для отримання покриттів з пористістю не більше 10 % і міцністю зчеплення до 120 МПа;

- встановлено взаємозв'язки параметрів процесу імпульсного іонного азотування та ступінь їх впливу на глибину дифузії азоту, мікротвердість та зносостійкість покриттів, отриманих електродуговим напиленням;

- отримано загальні закономірності, між параметрами процесу відновлення робочих поверхонь деталей засобів транспорту, які дозволяють керувати режимами комбінованого способу нанесення багатофункціональних покриттів.

Вдосконалено:

- розраховано – експериментальний метод визначення комплексу механічних характеристик системи «покриття – відновлювана поверхня», який відрізняється від існуючих одночасним визначенням основних механічних характеристик (пружності, адгезійної і когезійної міцності, тощо) цієї системи;

- метод моделювання процесу відновлювання елементів засобів транспорту при ремонті шляхом комбінованого способу формування багатофункціональних покриттів, який відрізняється від існуючих тим, що складається з математичних, фізичних та технологічних моделей і враховує вплив на механічні (міцність зчеплення, когезійна і адгезійна міцність), фізичні (пористість, мікротвердість) і експлуатаційні (зносостійкість) властивості відновлених поверхонь з покриттями,

які отримані комбінованим способом, що включає електроіскрове легування, електродугове напилення і імпульсне іонне азотування.

Набули подальшого розвитку:

– способи підготовки відновлюваної поверхні обґрунтованим способом електроіскрового легування для збільшення адгезійної міцності системи «покриття-відновлювана поверхня»;

– метод підвищення мікротвердості і зносостійкості відновлених поверхонь деталей засобів транспорту з напиленими покриттями шляхом їх дифузійного насичення іонами азоту в імпульсному режимі, який реалізується за рахунок дискретного введенні енергії, що забезпечує збільшення швидкості нагріву і швидкості дифузії азоту та відповідно в 2 – 5 разів прискорює процес обробки відновлюваних поверхонь з напиленим покриттям азотуванням;

– метод відновлення робочих поверхонь деталей засобів транспорту електродуговим напиленням покриттів шляхом визначення нових взаємозв'язків між експлуатаційними властивостями і надійністю відновлених деталей з напиленими покриттями з параметрами їх подальшої обробки імпульсним іонним азотуванням.

Практична значимість отриманих результатів. Розроблені моделі, методи, проведений синтез основних видів зношування деталей ЗТ та їх елементів, способів забезпечення їх надійності дозволяють реалізувати комбінований метод відновлення зношених поверхонь деталей ЗТ багатофункціональними покриттями, встановити параметри ремонтного процесу, що забезпечують задану якість відновлених поверхонь.

Розроблений комбінований спосіб дозволив замінити дорогі порошкові матеріали для покриттів на більш дешеві і менш дефіцитні сталі при підвищенні їх експлуатаційних властивостей більш ніж в 2 рази в порівнянні з традиційними способами. Отриманий спосіб відновлення робочих поверхонь деталей ЗТ пройшов апробацію при відновленні розподільчих валів суднових дизель-генераторів (СДГ) і валів суднових насосів (СН), дозволив вирішити задачу забезпечення їх ресурсу, який не поступається ресурсу нових деталей, шляхом оптимізації процесу нанесення покриттів, вибору їх матеріалу, управління його складом і структурою в процесі ремонту. Розроблені практичні рекомендації щодо відновлення валів СДГ і СН комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів на судноремонтних підприємствах.

Виконана дисертаційна робота дозволила розширити номенклатуру відновлюваних деталей ЗТ, організувати ділянку по їх відновленню і ремонту. Дослідно-промислова перевірка результатів досліджень була виконана в виробничих умовах на ТОВ «Мотортех» (м. Первомайськ), на Херсонському державному заводі «Палада» (м. Херсон), АО «Українська залізниця» регіональній філії «Донецька залізниця» структурному підрозділі «Попаснянське локомотивне депо» при відновленні деталей типу «вал» та на ДП НАЕК «Енергоатом» ВП «Атоменергомаш», ремонтно-механічному заводі (м. Южноукраїнськ). Висновки і основні результати дисертації використовуються при підготовці магістрів технічних спеціальностей в Херсонській державній морській академії на кафедрі експлуатації суднових енергетичних установок та при викладанні дисциплін «Організація та

технологія судноремонту» і «Технічне обслуговування і ремонт судових технічних засобів».

Особистий внесок автора. Результати роботи отримані автором особисто. Основні дослідження, описані в дисертації, були виконані автором під керівництвом наукового консультанта. Особистий внесок автора полягає у запропонуванні концепції забезпечення надійності деталей ЗТ застосуванням багатофункціональних покриттів в процесі ремонту, постановці завдань, їх експериментальному виконанні, аналізі та узагальненні отриманих результатів, розробці математичних моделей. Аналіз наукових результатів і основні висновки досліджень виконані спільно з науковим консультантом. Результати теоретичних і експериментальних досліджень, які виносяться на захист, отримані особисто автором.

Опубліковані роботи по темі дисертації написані автором після обговорення отриманих результатів зі співавторами. Роботи [11,30,33] виконані самостійно. В опублікованих роботах автору належить: обґрунтування доцільності відновлення деталей ЗТ комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів [1,2,39]; аналіз комбінованих методів відновлення деталей ЗТ [1,25,39]; характеристика проблеми використання покриттів в ремонтному виробництві [16,27]; аналіз інформаційних потоків, тенденцій і основні стратегічні напрямки розвитку ремонтної галузі [44]; характеристика умов експлуатації, причин і видів зносу деталей вузлів та агрегатів ЗТ [10,18,20,21,28,31]; діагностування дефектів ЗТ [3,6,12,17,19]; розробка комбінованого методу відновлення шляхом нанесення покриттів [2,4]; спосіб отримання покриттів [48,49]; оцінка впливу параметрів електродугового напилення (ЕДН) покриттів і конструкції обладнання на їх властивості шляхом використання математичного моделювання [5,9,23,32]; використання структурних аномалій в газотермічних покриттях (ГТН – покриттях) для підвищення зносостійкості деталей ЗТ [8,43]; використання теорій адгезії при формуванні покриттів [40]; обґрунтування доцільності використання газотермічного напилення для антикорозійного захисту деталей [5,30,11]; дослідження впливу хіміко-термічної обробки на властивості електродугових покриттів (ЕДН-покриттів) [36,33]; обґрунтування доцільності підвищення властивостей ГТН-покриттів імпульсним іонним азотуванням(ПА) [38]; дослідження процесу ПА [13]; значимість дифузійних процесів при ПА [41]; побудова моделі процесу обробки напилених поверхонь ПА [13,22]; вплив ПА на властивості ЕДН-покриттів [29,35,36]; аналіз триботехнічних характеристик покриттів [14]; дослідження корозійної стійкості деталей, відновлених покриттями [11]; результати відновлення ЗТ на прикладі валу розподільчого комбінованим методом нанесення покриттів [15,24,45]; використання ПА для зміцнення поршнів двигунів внутрішнього згорання [42]; відновлення валів судових дизель – генераторів і судових насосів комбінованою технологією [15,24,37,46,47].

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися, обговорювалися та отримали позитивну оцінку на: міжнародних науково-практичних конференціях «Безпека життєдіяльності на транспорті і виробництві-освіта, наука, практика» (Херсон, 2015 р.); «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для обслуговування» (м Херсон, 2015–2020 рр.);

«Якість, стандартизація, контроль: теорія і практика» (Затока, Одеська обл., 2015 р.; Одеса, 2016 р.); «Increase of Machine and Equipment Reliability (Кропивницький, ЦНТУ, 2020 р.); міжнародних науково-технічних конференціях «Інженерія поверхні і реновація виробів» (Затока, Одеська обл., 2015 р.; Одеса, 2017 р.; Свалява, Закарпатська обл., 2018 р.; Київ, 2020 р.); «Інноваційні технології в машинобудуванні» (Новополицьк, Білорусь, 2018 р. та 2020 р.); міжнародних науково-технічних семінарах «Сучасні проблеми підготовки виробництва і ремонту в промисловості і на транспорті» (Свалява, Закарпатська обл., 2016 р.) та International Scientific and Technical Seminar «Modern questions of productions and repair in industry and in transport» (Brno, Czech Republic, 2018; Tbilisi, Georgia, 2020).

Робота була розглянута на науково-технічних семінарах лабораторії зміцнення поверхні елементів конструкцій ІПМіц імені Г.С. Писаренко НАН України, м Київ, 2017 – 2020 р. р. і на кафедрі ЕСЕУ ХДМА (2019 – 2020 рр.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 49 наукових працях, у тому числі: 1 монографія; 28 публікацій у наукових фахових виданнях України та інших держав, у тому числі 4 публікації у виданнях, що індексуються у Scopus, віднесених до кватилів Q1 і Q2; 19 тез у збірниках доповідей на міжнародних наукових конференціях; один патент України на корисну модель.

Структура і об'єм роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи складає 457 сторінок, у тому числі основного тексту 305 сторінок, 89 рисунків та 44 таблиці. Список використаних літературних джерел складається із 527 найменувань на 48 сторінках, 12 додатків на 68 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми забезпечення надійності ЗТ шляхом використання багатофункціональних покриттів нанесених комбінованим способом, визначена мета досліджень і основні завдання, які необхідно вирішити для її досягнення, наукова новизна і практична цінність отриманих результатів.

У першому розділі проведено аналіз літературних даних за темою дисертаційної роботи, обґрунтована актуальність проблеми, що відображає необхідність розробки наукових основ забезпечення надійності ЗТ та їх елементів шляхом застосування багатофункціональних покриттів, що нанесені комбінованим способом, в процесі ремонту.

Проблема підвищення ресурсу ЗТ та їх елементів пов'язана з необхідністю визначення їх пошкоджень і причин виходу з ладу. Основними факторами, що визначають вид зносу деталей ЗТ є середовище, динаміка і кінематика їх відносного переміщення та характер контакту, властивості матеріалу деталей. Перші три чинники первинні і характеризують зовнішні умови експлуатації ЗТ та їх елементів, визначають кількісну та якісну сторони явищ зносу. На підставі аналізу умов експлуатації ЗТ встановлено, що до 60 % їх елементів виходять з ладу через знос і корозію, а 20 – 30 % деталей – через руйнування від втоми (рис. 1 а). Зношування

деталей ЗТ є наслідком нерівномірного розподілу навантаження, значних вібрацій, підвищених тисків та температур, попадання сторонніх часток і продуктів зношування в зону тертя. За даними досліджень, що виконані в роботах І.В. Возницького, Б.А. Ляшенко, Г.В. Захарова, В.П. Сторожева, знос поверхонь елементів ЗТ розподіляється наступним чином: циліндричні поверхні складають 53 %; конічні та сферичні – 3 %; шківні – 3 %; пази і канавки – 5 %; різьби – 10 %; плоскі поверхні – 1%; зуби шестерень – 2 %; профільні та фасонні поверхні – 1 %; тріщини і злами – 9 %; порушення геометричної форми – 13 %. При цьому, 40 % становить дефект, що зустрічається найбільш часто, – знос зовнішньої циліндричної поверхні (рис. 1 б).

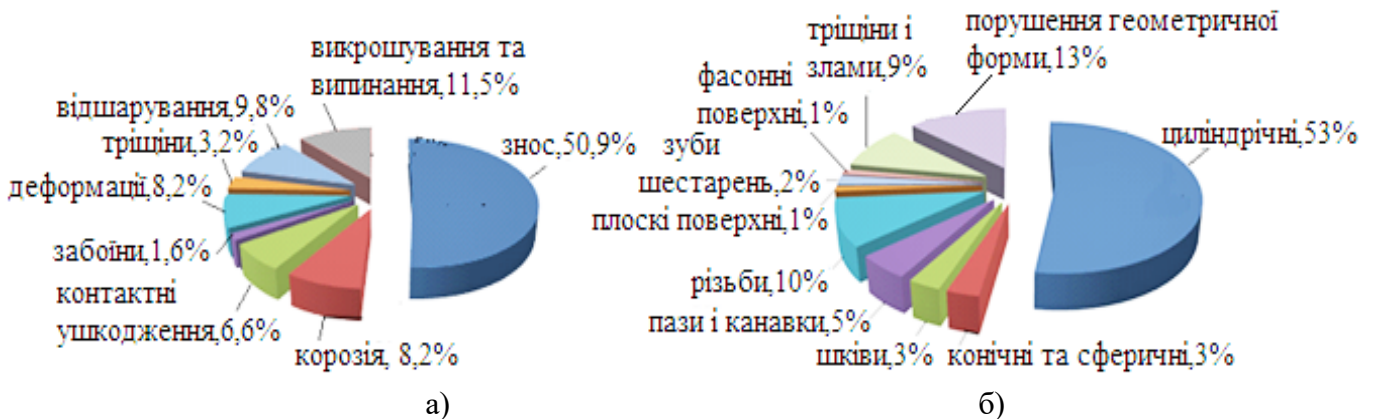


Рис. 1. Розподіл дефектів деталей ЗТ (а) та розподіл поверхонь їх деталей за видами зносу (б)

Узагальнюючи результати досліджень основних видів зношування елементів ЗТ зроблено висновок, що вони працюють в умовах, при яких експлуатаційні навантаження (тиск, температура, дія навколишнього середовища, тощо) сприймає, головним чином, їх поверхневий шар. Таким чином, достатньо відновлювати не всю деталь, а тільки її зношені робочі поверхні шляхом нанесення на них багатофункціональних покриттів.

У розділі представлений аналіз методів відновлення, які використовуються при ремонті деталей вузлів і агрегатів ЗТ, та показана доцільність і ефективність їх відновлення шляхом використання методів газотермічного напилення (ГТН), зокрема, електродугового напилення (ЕДН). Однак, твердість цих покриттів становить не більше 4000 МПа, адгезія не перевищує 40 МПа при пористості 20 – 30 %, що обмежує їх застосування, незважаючи на економічність процесу напилення дротяних матеріалів. Вдосконаленню способів ГТН, що використовуються для забезпечення надійності та підвищення ресурсу конструктивних елементів вузлів та агрегатів ЗТ, присвячені роботи К.А. Ющенко, Ю.С. Борисова, Ю.С. Харламова, Б.А. Ляшенко, М.А. Подригало, О.С. Полянського, Є.К. Посвятенко. Для підвищення властивостей ГТН – покриттів використовують методи поверхнево-пластичного деформування (ППД), ХТО, лазерної (ЛО), ультразвукової (УЗО) обробки. В останні роки, найважливішим завданням в галузі дослідження процесів і явищ, що протікають при ГТН, стало вишукування нових способів їх синтезу, які дозволять забезпечити надійність та підвищити ресурс ЗТ. Шляхом аналізу літературних даних показана ефективність синтезу електроіскрового легування (ЕІЛ), ЕДН і ПА для створення комбінованої методу нанесення багатофункціональних покриттів з метою забезпечення надійності та підвищення ресурсу ЗТ в процесі відновлення їх

конструктивних елементів. Обґрунтовано, що серед способів нанесення багатофункціональних покриттів найбільш поширений, найдешевший і найпростіший метод ЕДН. Підвищити адгезійну і когезійну міцність напилених покриттів можливо шляхом поєднання процесу ЕДН з ЕІЛ, з огляду на такий його недолік як значна шорсткість поверхні. Найбільшого ефекту за несучою здатністю, підвищенням твердості, зносостійкості і витривалості відновлюваних деталей з напиленими покриттями при зниженні їх деформації можна забезпечити обробкою ПА.

З урахуванням проведеного аналізу стану проблеми зроблені висновки, визначена мета, поставлені задачі й обґрунтована методологія досліджень.

У другому розділі запропоновані основні принципи формування концепції забезпечення надійності відновлюваних деталей ЗТ в процесі ремонту, яка відображає функціональні, експлуатаційні, матеріально – технічні та технологічні аспекти ремонту деталей ЗТ шляхом використання зміцнюючих захисних покриттів (ЗЗП), нанесених комбінованим способом.

Науковою основою для раціонального та ефективного досягнення мети дослідження в роботі використано положення системного підходу, а саме сукупність методологічних принципів та положень, що дозволяють розглядати забезпечення надійності та підвищення ресурсу ЗТ та їх елементів як єдину систему з узгодженням діяльності всіх її підсистем. В основу покладено вивчення кожного елемента системи в його зв'язку і взаємодії з іншими елементами, спостереження за змінами, що проходять у системі, виявлення специфічних системних властивостей, висунення обґрунтованих припущень відносно закономірностей розвитку системи та визначення раціональних режимів її функціонування.

Методологія встановлює оптимальні послідовності багатоопераційних (адитивних) технологій відновлювання поверхні, при якій досягаються максимальні експлуатаційні властивості деталей при мінімальних витратах на відновлення їх поверхні в процесі ремонту.

Для ефективного вирішення проблеми забезпечення надійності та підвищення ресурсу ЗТ та їх елементів була виявлена системна взаємодія факторів, що визначають хід процесу відновлення комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів у вигляді схеми структурних взаємозв'язків та отримана морфологічна матриця формування процесу ремонту з урахуванням можливих варіантів відновлення деталей ЗТ.

В основу покладено вивчення кожного елемента системи в його зв'язку і взаємодії з іншими елементами, спостереження за змінами, що проходять у системі, виявлення специфічних системних властивостей, висунення обґрунтованих припущень відносно закономірностей розвитку системи та визначення раціональних режимів її функціонування.

Формалізовано завдання забезпечення заданих властивостей поверхневих шарів деталей.

Деталь D , поверхня якої Π характеризується множиною параметрів $\{P_i\}_{i=1, \dots, M}$, кожен з яких має свою область допустимих значень $\{A_i\}_{i=1, \dots, M}$ (з позицій інженерної практики під параметрами P_i можна прийняти шорсткість, зносостійкість,

пористість, мікротвердість тощо).

При цьому апріорно вважатимемо, що дві поверхні Π^1 і Π^2 є ідентичними із заданою точністю, якщо існує така сукупність $\{\varepsilon_i\}_{i=1,\dots,M}$, для якої $|P_i^1 - P_i^2| < \varepsilon_i$ ($i=1,\dots,M$), де P_i^1 – параметр, що описує поверхню Π^1 , P_i^2 – параметр, що описує поверхню Π^2 , $|\dots|$ – модуль числа.

Існує N технологій поверхневої обробки деталі $\{T_1, \dots, T_N\}$, кожна з яких має X вхідних (керуючих) параметрів: $\{q_1^i, \dots, q_X^i\}$, $i=1, \dots, N$, які належать своїм допустимим значенням $\{Q_1^i, \dots, Q_X^i\}$.

В результаті використання i – тої технології з параметрами $\{q_1^i, \dots, q_X^i\}$ поверхня деталі зі стану Π^k перейде в стан Π^{k+1} , тобто $T_i(q_1^i, \dots, q_X^i): \Pi^k(P_1^k, \dots, P_M^k) \rightarrow \Pi^{k+1}(P_1^{k+1}, \dots, P_M^{k+1})$ за час $t = F(T_i(q_1^i, \dots, q_X^i), \Pi^k)$, з «ціною даного рішення» $E = G(T_i(q_1^i, \dots, q_X^i), \Pi^k)$ і експлуатаційними параметрами $D = M(T_i(q_1^i, \dots, q_X^i), \Pi^k)$.

В початковий момент часу поверхня деталі D має параметри Π^0 , а потрібно отримати поверхню з параметрами Π^L .

Процес переходу поверхні зі стану Π^0 в Π^L є не одномоментним, а вимагає використання певної послідовності технологій T_{Z_1}, \dots, T_{Z_L} , яка переведе поверхню Π^0 в Π^L через сукупність проміжних станів:

$$\Pi^0 \xrightarrow{T_{Z_1}} \Pi^1 \xrightarrow{T_{Z_2}} \dots \xrightarrow{T_{Z_{L-1}}} \Pi^{L-1} \xrightarrow{T_{Z_L}} \Pi^L$$

Відзначимо, що таких послідовностей типу T_{Z_1}, \dots, T_{Z_L} може бути багато.

Для конкретизації послідовності і знаходження кращої послідовності поставимо у відповідність технології $T_{Z_i}: \Pi^{(i-1)} \rightarrow \Pi^i$ час рішення τ_{Z_i} і E_{Z_i} ціну рішення.

При цьому загальний час дорівнює:

$$\tau_0 = \sum_{Z_i} \tau_{Z_i}$$

Загальна ціна технологічного рішення встановлюється з співвідношення:

$$E_0 = \sum_{Z_i} E_{Z_i}$$

Експлуатаційні параметри дорівнюють:

$$D_0 = D_L(T_i(q_1^i, \dots, q_X^i), \Pi^{L-1})$$

У загальному випадку функція оптимізації буде наступною:

$$R = R(t_0, E_0, D_0) \rightarrow R_0$$

При цьому узагальнена постановка завдання використання комбінованого способу

нанесення багатofункціональних покриттів матиме такий вигляд: необхідно встановити таку послідовність технологій T_{z_1}, \dots, T_{z_L} , які переводять поверхню деталі зі стану Π^0 в Π^L і забезпечують задане значення функціоналу R , що дорівнює R_0 .

Оскільки ці задачі є багатовимірними з відсутністю чітко виражених аналітичних функціональних залежностей, виберемо для вирішення задачі в якості базового підхід, описаний в роботі.

Маючи множину базових технологій $\{T_1, \dots, T_N\}$, сформулюємо наступні послідовності їх використання:

$$\begin{aligned} &\langle T_1 \rangle, \dots, \langle T_N \rangle \\ &\langle T_1, T_1 \rangle, \langle T_1, T_2 \rangle, \dots, \langle T_N, T_{N-1} \rangle, \langle T_N, T_N \rangle \\ &\langle T_1, T_1, T_1 \rangle, \dots, \langle T_N, T_N, T_N \rangle \end{aligned}$$

Введемо оператор $K(P, \{\Pi_0, \Pi_1\})$, який набуває наступних значень:

$$K(P, \{\Pi_0, \Pi_1\}) = \begin{cases} 1, & \text{якщо послідовність } P \text{ дозволяє перехід } \Pi_0 \rightarrow \Pi_1 \\ 0, & \text{якщо послідовність } P \text{ не дозволяє перехід } \Pi_0 \rightarrow \Pi_1 \end{cases}$$

де P – задана послідовність базових технологій.

Оператор $K(P, \{\Pi_0, \Pi_1\})$ назвемо оператором компетенції заданої послідовності технологій.

Вибравши послідовності технологій P , для котрих $K(\dots, \{\Pi_0, \Pi_k\})=1$, проводимо вибір параметрів $(q_1^{z_1}, \dots, q_x^{z_x})$, які забезпечують задане значення функціоналу R .

При цьому найпростішим і інженерно зрозумілим є знаходження функціоналу R в разі подання його як адитивної суперпозиції за складовими технологічних операцій знайденої послідовності P^* :

$$R = \sum_{i=1}^m R_i,$$

де R_i – функціонал, співвіднесений з i – тою технологією заданої послідовності P^* , $P^* \in P$.

Виходячи із положень системного підходу, організація дослідження становить собою ієрархічну структуру методологічних рівнів: Взаємозв'язок факторів, що

визначають хід процесу ремонту представлений у вигляді структурної схеми формування багатofункціональних покриттів на всіх етапах ремонту елементів ЗТ (рис. 2).

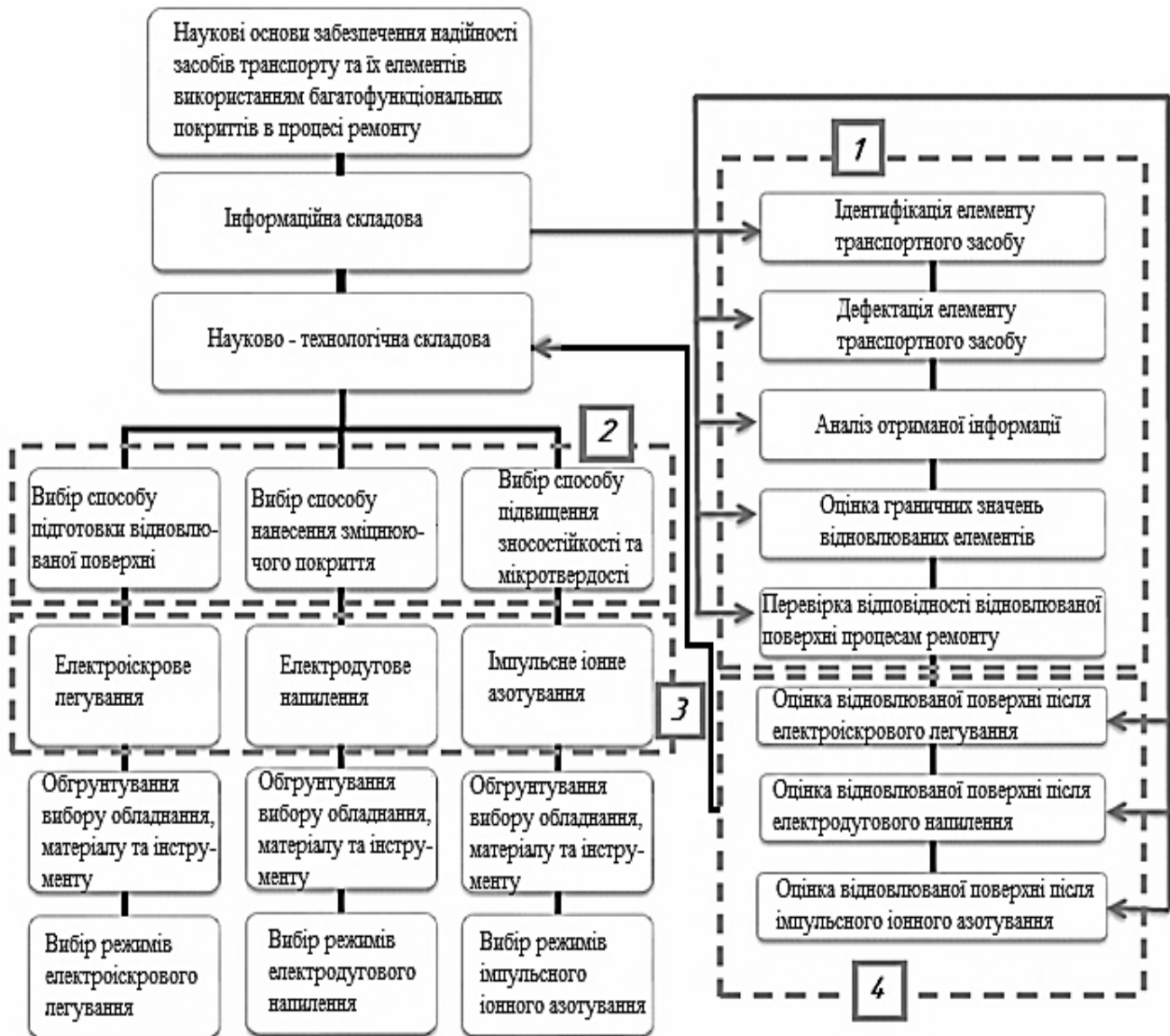


Рис. 2. Структурна схема формування багатofункціональних покриттів в процесі ремонту деталей ЗТ

1 рівень: формалізація проблеми дослідження, що включає, відображення сутності та актуальності проблеми, визначення мети, загальну постановку задачі та шляхів вирішення;

2 рівень: концептуальні дослідження, що включає комплексний підхід до аналізу існуючих способів ремонту, формування з них ремонтної технології, що забезпечує надійність ЗТ та їх елементів;

3 рівень: операційні дослідження, що враховують обґрунтований вибір обладнання, матеріалів, режимів, способів управління та контролю процесу ремонту елементів ЗТ на всіх етапах;

4 рівень: заключний етап прийняття щодо вибору оптимальних параметрів ремонтного процесу, що дозволить вирішити наукову проблему.

У третьому розділі наведено обладнання, матеріали, методи та методики, що забезпечують процес ремонту.

Підготовку поверхні ЕІЛ проводили на установці «Елітрон – 22». Використання установки обумовлено її простотою, компактністю, низькою енергоємністю, високим коефіцієнтом використання матеріалів (КВМ), локальним легуванням поверхні, відсутністю попередньої підготовки поверхні, можливістю застосування різних легуючих електродів (ніхром, молібден, тверді сплави та інші).

Аналіз технічних характеристик вітчизняного та закордонного обладнання для ЕДН показав, що найбільш переважними з точки зору експлуатації, якості отриманих покриттів і вартості є ручний апарат АДН – 10 і стаціонарний АДН – 8. В якості матеріалу покриття використовували дріт діаметром 1,6 – 2,0 мм зі сталей мартенситного класу (40X13) і аустенітного класу (X18H10T).

Азотування зразків з напиленням покриттями із сталі 40X13 і X18H10T проводили в спеціальній установці, розробленій в ІПМіц ім. Г.С. Писаренко НАН України.

Дослідження мікроструктури покриттів після ЕДН і ПА проводилося на не травлених і травлених шліфах на мікроскопі «MeF – 3» фірми «Reichert» (Австрія) при збільшеннях '100, '200, '500, а металографічні дослідження сталей після ЕІЛ – на мікроскопах МІМ – 8М і "Неофот – 21". Для визначення кількості залишкового аустеніту, мартенситу та інших складових сталей використовували рентгеноструктурний аналіз і електронну мікроскопію. Визначення хімічного складу покриттів проводилося з використанням методу рентгеноспектрального мікроаналізу (РСМА). Визначення розподілу елементів здійснювали методом електронної мікроскопії шляхом сканування (СЕМ) на електронному мікроскопі «CamScan» («Oxford Instruments», Англія, роздільна здатність 70Å) з рентгеновським енергодисперсійним аналізатором. Фазові і структурні перетворення в відновлених поверхнях з покриттями визначали за допомогою рентгеноструктурного аналізу. Рентгеновську зйомку здійснювали дифрактометром ДРОН–3.0 у монохроматизованому CoK_{α} випромінюванні ($V=30$ кВ, $I=10$ мА). Для фазового аналізу використовувалася стандартна картотека PDF. Фотографічні зображення топографії поверхонь з покриттями отримували з використанням скануючого растрового електронного мікроскопа «Нанолаб – 7» фірми «Оптон» (Німеччина).

Оцінку розподілу пор по об'єму покриття проводили планіметричним методом металографічного аналізу. Для підтвердження результатів визначення пористості відновлених поверхонь з покриттями використовували автоматичний аналізатор зображення «Mini-Magiscan» (фірма «Joyce Loebel», Англія) за програмою «Genias 26».

Для оцінки напівкількісного критерію інтенсивності розчинення поверхні користувалися потенціодінамічним методом, агресивне середовище – кухонна сіль у відношенні 5 г/150 г води.

Адгезійна та когезійна міцність досліджувалась на розривній машині FM – 1000. Величина зусиль розтягу фіксували динамометром, який має три шкали з максимальними навантаженнями: 200 кг, 500 кг, 1000 кг. Для визначення критичної деформації системи «основа – покриття» використовувався прилад акустичної емісії

АФ15. Визначення залишкових напружень в покриттях здійснювали на основі експериментально – розрахункового методу гнучкого зразка. Дослідження напружено-деформованого стану системи «покриття – відновлена поверхня» виконували з використанням ліцензованого кінцево-елементного комплексу MSC Visual Nastran for Windows 2003 вибір якого обумовлений відносною простотою і універсальністю.

Вимірювання мікротвердості від краю відновлюваної поверхні з покриттям з захопленням перехідної зони проводилося на мікротвердомірі «Micromet-II» при навантаженні 100 г протягом 15 с. Твердість відновленої поверхні визначали електронним переносним програмованим твердоміром ТЕМП – 3.

Випробування на тертя і знос проводили на модернізованій машині типу 2070 СМТ – 1. Номінальний контактний тиск випробувань становив 3 МПа, питоме навантаження випробувань – 0,6 – 1,5 МПа. Випробування проводили до досягнення 10000 циклів (шлях тертя 150 – 500 м) з визначенням вагового зносу зразка. Опір зносу визначався по реєстрованій величині лінійного зношування. Величина зносу зразків також визначалася по втраті ваги при випробуваннях. Зважування кожного зразка проводилося не менше 2–3 разів. Похибка вимірювання маси зразка становила 0,05 мг. Шлях тертя при дослідженнях знаходився в межах від 5000 до 8000 м. Інтенсивність зношування розраховувалася за результатами оцінки зменшення маси зразка в процесі випробувань за допомогою аналітичних ваг АДВ – 200.

Для дослідження геометричних параметрів застосовували профілограф – профілометр моделі 201 і «Talysarf – 5» фірми «Taylor – Hobson».

Оцінку точності експериментальних результатів, які містять систематичні і випадкові помилки, проводили за допомогою методів теорії ймовірностей і математичної статистики.

У четвертому розділі запропоновано для відновлення деталей ЗТ застосувати комбінований спосіб формування багатофункціональних покриттів, що включає процеси ЕІЛ, ЕДН, ПА; обґрунтована доцільність його використання, представлені результати теоретичних та експериментальних досліджень.

Схема покриття, отриманого комбінованим способом (рис. 3, а), і основні етапи його створення показані на рис. 3, б, в, г:

– перший етап – обробка відновлюваних поверхонь ЕІЛ при одночасному нанесенні підшару з ніхрому (Х20Н80) з метою підвищення міцності зчеплення ЕДН – покриттів (рис. 3, б);

– другий етап – нанесення покриттів ЕДН дротяних сталей 40Х13/Х18Н10Т шляхом розпилення металу, розплавленого в електричній дузі, струменем продуктів згорання пропано – повітряної суміші (рис. 3, в);

– третій етап – обробка ЕДН – покриттів ПА (рис. 3, г).

Можливості методу ЕІЛ (рис. 3, б) – не тільки зміцнення відновлюваних поверхонь, але і їх обробка перед нанесенням покриттів ЕДН для підвищення адгезійної міцності системи «напилене покриття – відновлена поверхня». Аналіз технічних характеристик основних методів, що застосовуються для обробки поверхонь перед ЕДН покриттів, показав (табл.1), що метод ЕІЛ забезпечує

найвищу міцність зчеплення напиленого покриття з відновлюваною поверхнею (рекомендована шорсткість поверхні R_a перед ЕДН становить 63 – 120 мкм).

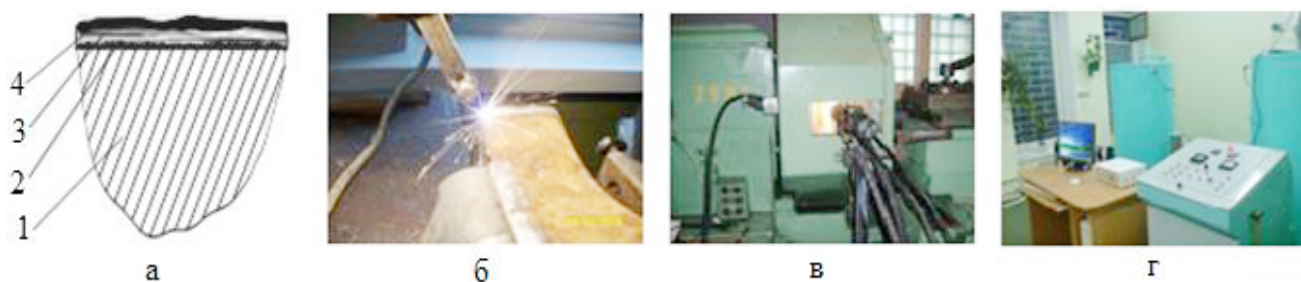


Рис. 3. Отримання багатофункціональних покриттів комбінованим способом: а) схема покриття; б) обробка відновлюваної поверхні ЕІЛ; в) ЕДН покриттів; г) ПА напилених покриттів; 1 – основа (відновлювана поверхня); 2 – прошарок з Х20Н80; 3 – ЕДН - покриття з дротяних сталей 40Х13/Х18Н10Т; 4 – шар напиленого покриття після ПА

Таблиця 1

Вплив способу підготовки поверхні на міцність зчеплення покриттів

Спосіб підготовки відновлюваної поверхні	Міцність зчеплення, МПа	Шорсткість відновлюваної поверхні, мкм
Обробка дробом	80 - 100	63 - 100
Обдування піском	30 - 35	40 - 60
Нарізання різьблення	100 - 140	80 - 120
Нанесення насічок	100 - 120	80 - 100
Електроіскрова обробка	120 - 150	63 - 80

Метод електроіскрової обробки (ЕІО) відновлюваних поверхонь перед нанесенням покриттів ЕДН дозволяє управляти міцністю зчеплення системи «покриття – відновлювана поверхня» в широких межах шляхом зміни хімічного складу поверхневого шару при використанні різних матеріалів в якості електрода.

Основні закономірності процесів при ЕІЛ можна представити у наступному вигляді:

- маса матеріалу, що переноситься з електродів в результаті дії імпульсу при інших рівних умовах пропорційна кількості електрики, що протікає протягом імпульсу і залежить від крутизни імпульсу і хімічного складу електродів;
- кількість матеріалу (γ), що переноситься визначається як:

$$\gamma = E \times k \times f \times \tau, \quad (1)$$

де E – енергія одиничного імпульсу, Дж; k – коефіцієнт, який визначається фізичними константами матеріалу електродів, складом середовища і тривалістю імпульсів; f – частота імпульсів, Гц; τ – час електроіскрової обробки, с; γ – кількість матеріалу, г.

- ерозія підсумовується з імпульсами;
- всі матеріали утворюють ряд за ерозійною стійкістю.

Електродугове напилення покриттів – основна операція процесу відновлення деталей ЗТ (рис. 4, в). ЕДН здійснювалося за такими режимами:

- режим 1 – розпилення металу, розплавлено у факелі пропано-кисневого полум'я швидкісним струменем повітря;
- режим 2 – розпилення металу, розплавленого в електричній дузі, реактивним струменем продуктів згорання пропано-повітряної суміші при надлишку пропану (відновлювальна атмосфера);
- режим 3 – розпилення металу, розплавленого в електричній дузі, реактивним струменем продуктів згорання пропано-повітряної суміші при надлишку повітря (окислювальна атмосфера);
- режим 4 – розпилення металу, розплавленого в електричній дузі, швидкісним струменем повітря.

В якості матеріалу покриття використовували дрiт діаметром 2 мм зі сталей 40X13 і аустенітного класу X18N10T. Основні параметри ЕДН: напруга – 30 – 32 В; силі струму – 200 – 300 А; дистанції напилення – 80 – 150 мм; витрати стисненого повітря – 80 м³/год.; витрати пропан – бутану – 0,011 кг/хв.; тиск стисненого повітря – 0,45 МПа; тиск пропан – бутану – 0,4 МПа. Швидкість переміщення апарату для ЕДН визначає товщину покриття за один прохід – 0,2 – 0,3 мм.

Процес напилення покриттів є результатом фізико-хімічних взаємодій:

- в системі «горючий газ – окислювач», в результаті якої утворюється енергія, кількість якої визначається складом суміші продуктів горіння, що супроводжується значним підвищенням температури газів в зоні реакції, підвищенням їх тиску і швидкості переміщення в напрямку фронту полум'я;
- продуктів горіння з дротом, в процесі якої він нагрівається до температури плавлення з утворенням рідкої фази;
- повітряного потоку з розплавом дроту і утворення струменю розпилюємих частинок;
- перетворення кінетичної енергії розпилюємих частинок в роботу деформації в процесі їх механічного контакту з відновлюваною поверхнею, передача внутрішньої (теплової) енергії від частинок деталі.

Впливати на кількісні і якісні характеристики фізико-хімічних взаємодій при ЕДН на експлуатаційні властивості відновлюваних деталей ЗТ можна шляхом його управління. В розділі запропоновані основні підходи управління процесом ЕДН: складом і властивостями несучого середовища і матеріалу покриття, швидкістю та температурою суміші і частинок розплавленого матеріалу, що розпилюються, для підвищення експлуатаційних властивостей і терміну служби деталей ЗТ.

При відновленні деталей ЗТ шляхом ЕДН покриттів можна розширити можливості регулювання процесу ЕДН покриттів за рахунок зміни складу транспортуючого газу, що впливає на температуру, швидкість і окислювальну здатність частинок, що розпилюються. Процес відновлення деталей ЗТ ЕДН покриттів, при якому розпилення матеріалу покриття здійснювалося струменем продуктів згорання пропано-повітряної суміші характеризується: підвищенням швидкостей частинок, що розпилюються; зменшенням середнього розміру частинок в 4 – 7 разів; підвищенням температури струменя розпилення; збільшенням кількості частинок, що осаджуються уздовж відновлюваної поверхні деталі. Швидкість польоту частинок, що розпилюються, становила 120 – 130 м/с (режими 3,4) і 400 – 500 м/с (режими 1,2). Розміри частинок, з яких формувалися

покриття, перебували в межах 15 – 40 мкм.

Використанням в якості транспортуючого газу замість повітря продуктів згорання пропано–повітряної суміші (табл. 2) та їх варіюванням можна створювати нейтральну або відновлювальну атмосферу в зоні плавлення дроту зі сталей 40X13 і X18H10T, і тим самим знижувати окислення металу і вигоряння легуючих елементів.

В покритті вуглецю вдвічі менше, ніж у вихідному матеріалі покриття при однаковій кількості повітря і пропану, а при розпиленні матеріалу покриття чистим повітрям вміст вуглецю зменшується майже в три рази (табл. 2). Збільшення кількості повітря в суміші з паливним газом призводить до зменшення вмісту вуглецю в покритті (табл. 2). Відсутність кисню в якості окиснювача палива знижує собівартість покриттів та підвищує надійність і безпеку проведених робіт. Кількість кисню в покриттях зростає зі зменшенням вмісту пропану в горючій суміші (табл. 2).

Таблиця 2

Вплив складу горючої суміші, що утворює розпилюючий факел, на вміст вуглецю і кисню в покриттях зі сталі 40X13

Режим наплення	Об'ємне співвідношення повітря і пропану у суміші	Кількість кисню у покриттях, %	Кількість вуглецю у покриттях, %
Режим 1 - ГПН	пропан – киснева суміш співвідношення (1/4)	1,3	0,6
Режим 2 - ЕДН	пропан – повітря (1/18)	1,4	0,5
Режим 3 - ЕДН	пропан – повітря (1/30)	2,2	0,4
Режим 4 - ЕДН	чисте повітря	3,3 – 3,5	0,4

В роботі досліджувався вплив витрат розпилювального повітря на кількість кисню в напилених покриттях (рис. 4). Вміст кисню в ЕДН – покриттях в 2,5 – 3 рази більше, ніж в ГПН (рис. 4, рис. 5), причому максимальна концентрація 3,8% досягається при витратах близько 0,5 м³/хв. Основна кількість оксидів утворюється в результаті контакту розплавлених частинок з повітрям (рис. 5).

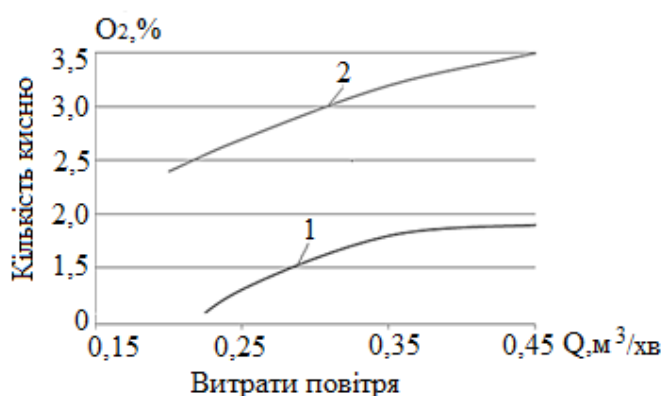


Рис. 4. Вплив витрат повітря, що розпилюється на кількість кисню в покриттях, отриманих по режиму 1 (1) і – режиму 4 (2)

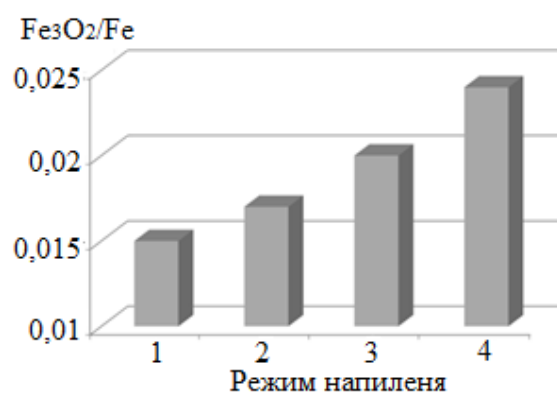


Рис. 5. Відносний вміст окису Fe₃O₄ в напилених покриттях: 1 – ГПН (режим 1); 2 – ЕДН (режим 2, відновна атмосфера); 3 – ЕДН (режим 3, окислювальна атмосфера); 4 – ЕДН (режим 4, повітря).

Підвищення коефіцієнта надлишку (α) повітря в горючій суміші від 0,8 до 1,7 викликає зростання вмісту кисню в покриттях від 1,3 до 3,5% (табл. 2). Коефіцієнт надлишку α повітря визначається за формулами (2) і (3):

$$\alpha = \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{п}}^0}, \quad (2)$$

$$\alpha = \left(\frac{G_{\text{п}}}{G_{\text{пр}}} \right) / 23,8, \quad (3)$$

де $V_{\text{п}}$ – об'єм повітря, що надійшло; $V_{\text{п}}^0$ – теоретичний об'єм повітря, який необхідний для 1 м^3 газу, $V_{\text{п}}^0 = 23,8 \text{ м}^3$; $G_{\text{п}}$ витрата повітря; $G_{\text{пр}}$ – витрата пропану, $\text{м}^3/\text{год}$.

В результаті досліджень встановлено, що при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 1,0 - 1,1$ і при дистанції напилена – 80 – 150 мм швидкість потоку при ЕДН забезпечує ефективне диспергування крапель розплавленого матеріалу покриття. Дисперсність частинок матеріалу, що розпилюється, визначали за формулою:

$$d_{\text{ср}} = K_1 \times \left(\frac{3,75}{R_0} + 0,29 \right) \times \sqrt[3]{\frac{G}{\lambda \times \mu_2}}, \quad (4)$$

де K_1 – коефіцієнт розмірності; R_0 – радіус сопла і G – продуктивність апарату для напилена; λ – щільність напиленого шару покриття; μ_2 – коефіцієнт рівномірності процесу пилоутворення.

Результати досліджень дозволили визначити, що найбільші фракції частинок складають мінімальну масову долю в загальній картині розподілу розпилюємих часток всіх фракцій. Ефективне диспергування крапель розплавленого матеріалу покриття залежать від його складу і режиму напилена (напруги дуги, тиску стисненого повітря та ін.) та підвищує щільність (зменшує пористість) напиленого покриття та знижує його окислення, що дозволяє отримувати поверхні, які відновлюються, максимальної якості.

В роботі отримані залежності, що дозволяють прогнозувати параметри ЕДН (температуру та швидкість матеріалу, що розпилюється, і газу, що розпилює) та дають можливість аналітично оцінити їх вплив на якість відновлюваної поверхні. При розрахунку температури полум'я вважали, що в процесі горіння весь кисень повітря бере участь в реакції горіння. Реакція горіння пропану відбувається за рівнянням:



Розрахунок температури горіння $T_{\text{к}}$ виконували методом послідовних наближень:

$$T_{\text{к}} = T_1 + (Q_{\text{р}}^{\text{н}} - Q_{\text{р1}}) \times \frac{T_2 - T_1}{Q_{\text{р2}} - Q_{\text{р1}}} \quad (6)$$

При температурі 2100°C теплотворна здатність пропану дорівнює $Q_{\text{р}}^{\text{н}} = 22800 \text{ ккал/м}^3$, а при температурі 2200°C – $Q_{\text{р2}} = 22645 \text{ ккал/м}^3$. Температура

горіння пропано-повітряної суміші $T_k > 2215^\circ\text{C}$:

$$T_k = T_n + (i_0 - i_2) \times \frac{T_b - T_n}{i_1 - i_2} \quad (7)$$

В рівнянні (7) теплоємність продуктів горіння i_1 та i_2 , ккал/м при температурі $T_b=2000^\circ\text{C}$ і $T_n=1800^\circ\text{C}$, відповідно. Всі розрахунки проводили при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha \geq 1$. Розрахункова температура горіння відрізняється тим, що при її визначенні враховується теплота дисоціації продуктів горіння.

Таким чином, основними параметрами процесу нагрівання металу за рахунок теплообміну є температура полум'я і коефіцієнт теплопередачі від полум'я до металу, які залежать від складу вихідної газової суміші і умов її палива.

За допомогою отриманих залежностей (2) – (7) встановлено, що збільшення температури струменя транспортуючого газу з частинками матеріалу покриття, які розпилюються, дозволяє збільшити його швидкість і зменшити діаметр крапель, що розпилюються, і тим самим підвищити щільність і знизити окислення відновлюваних поверхонь, що забезпечить їх максимальну якість. Таким чином, на щільність покриття і міцність зчеплення мають вплив температура і дисперсність розпилення.

Ефективним шляхом вирішення проблеми обробки відновлених поверхонь із ЕДН – покриттями при одночасному підвищенні їх експлуатаційних характеристик є формування в них високоміцних поверхневих шарів шляхом застосування в якості методу обробки ПА. Метод ПА відрізняються технологічністю, екологічною безпекою і економічною ефективністю, тому він був запропонований для обробки ЕДН-покриттів з одночасним їх модифікуванням для підвищення твердості, зносостійкості і експлуатаційних властивостей відновлених деталей ЗТ.

Головна особливість ПА – використання ефекту аномального масопереносу азоту на поверхні оброблюваної деталі за рахунок циклічного включення тліючого розряду. Обробка ЕДН-покриттів ПА здійснювалася в вакуумі з використанням в якості реакційного газу азоту і суміші аргон-водень на установці, розробленій в ПМіц ім. Г.С. Писаренко НАН України (рис. 3, г).

Процес ПА включає в себе наступні етапи: 1) підведення азоту з відповідного середовища до поверхні деталі з ЕДН-покриттям; 2) створення прикордонного шару біля поверхні деталі, де на міжфазній межі середовища-метал відбувається дисоціація середовища, що містить азот, і адсорбція поверхнею атомів азоту; 3) проникнення атомів азоту через поверхню в матеріал напиленого покриття; 4) дифузія атомів азоту в поверхневий шар на межі зерен і через зерна. При цьому керуючими параметрами є: температура насичення; тиск газу; склад газу; час повної обробки ПА; форма і тимчасова інтенсивність ведення енергії.

При дослідженні процесу ПА ЕДН – покриттів були вибрані параметри: час дифузійного насичення – 90 – 240 хв.; тиск реакційного газу – 25–250 Па; склад газу – 90%N₂+5 %C₃H₈+5%Ar; 95%N₂+5%С₃Н₈; 80%N₂+5%С₃Н₈+15%Ar); температура процесу дифузійного насичення – 673 – 873 К; експлуатаційна температура – 663 – 913 К.

Було визначено, що при ПА ЕДН-покриттів з пористістю більше 8 % має місце їх відшарування (табл. 3). При цьому присутність термодинамічно стабільного

легованого хромом оксиду Fe_3O_4 у вигляді плівок, що розділяють напилені частинки, ускладнює дифузійне перенесення азоту від верхнього шару покриття до нижнього шару. Наявність великої кількості оксидних плівок в покритті – бар'єр для реалізації процесу ПА, так як поверхня пор покрита тонким шаром оксидів заліза і це – основна причина, згідно якої покриття з пористістю більше 8 % неможливо азотувати без утворення дефектних ділянок. Оксиди утворюються як під час розпилення розплавлених частинок, так і в процесі їх кристалізації на поверхні деталі, що відновлюється. По цій же причині має місце і відносно невелика глибина насичення азотом ЕДН-покриттів (15 – 30 мкм) в порівнянні з литою сталлю. Найбільша глибина ПА має місце в ЕДН-покриттях при зниженні вмісту оксидних плівок. Виключити утворення плівок оксидів можливо при розпиленні сталевих дротів продуктами згорання пропану і повітря по режимам 2 і 3 (табл. 3).

Таблиця 3

Результати досліджень топографії ЕДН-покриття після його обробки ПА при 780 К

Метод напилення	Матеріал, що напилюється	Пористість покриття, %	Мікротопографія поверхні
ЕДН по режиму 4 (розпилення повітрям)	49X13 X18N10T	≈ 10 ≥ 8	відшарування відшарування
ЕДН по режимам 2 і 3 (розпилення сумішшю пропан-повітря)	40X13 X18N10T	≈ 6 ≈ 5	гладка поверхня без змін гладка поверхня без змін
ЕДН по режиму 4 (розпилення повітрям)	40X13 X18N10T	≈ 10 ≥ 8	відшарування відшарування
ЕДН по режимам 2 і 3 (розпилення сумішшю пропан-повітря)	40X13 X18N10T	≈ 6 ≈ 5	гладка поверхня без змін гладка поверхня без змін

Таким чином, доцільно ПА ЕДН-покриттів з щільністю 92 – 94 %. Підвищення твердості і зносостійкості поверхонь деталей з ЕДН покриттями при їх обробці ПА забезпечується за рахунок утворення твердих розчинів азоту завдяки реалізації при ПА ефекту прискореної дифузії речовини, який отримав назву «аномальний масоперенос». Широке впровадження даного ефекту потребує вирішення наукової проблеми управління дифузійними процесами в приповерхневих напилених шарах в процесі їх обробки ПА.

Для вирішення проблеми управління дифузійними процесами в шарах ЕДН-покриттів в процесі їх ПА були використані підходи термодинаміки – дифузійної теорії пружності Я.С. Підстригача і локально-нерівноважної термодинаміки Я.Й. Бурака та проведено аналіз моделей механіки, які описують взаємопов'язані процеси силової, термічної та дифузійної природи, а також фізичні уявлення про вплив структурних параметрів на інтенсивність масопереносу в азотованих шарах ЕДН-покриттів. На основі аналізу моделей механіки, які описують взаємопов'язані процеси силової, термічної та дифузійної природи, а також фізичні уявлення про вплив структурних параметрів на інтенсивність масопереносу в азотованих шарах ЕДН – покриттів запропонована постановка задачі управління їх дифузійним насиченням в умовах ПА.

Для управління ефектом прискореної дифузії речовини, який отримав назву «аномальний масоперенос» були вибрані фактори, які впливають на процес дифузії та швидкість масопереносу при обробці ПА поверхонь з ЕДН – покриттями: час

насичення напиленого покриття азотом, температура, параметри зовнішніх силових впливів, структурно – фазовий стан матеріалу в початковий момент часу. При цьому коефіцієнт дифузії в середовищі має вигляд:

$$D_m = D_0 + C|\dot{\epsilon}|^\alpha \times \exp\left(\frac{\beta}{T}\right) \quad (8)$$

де D_0 – коефіцієнт дифузії в разі відсутності деформацій; $\dot{\epsilon}$ – швидкість деформацій; α, β – константи; T – температура.

При проходженні дифузних процесів в ЕДН-покриттях коефіцієнт дифузії істотно залежить від структури покриття, яка може задаватися довільною кількістю змінних. У зв'язку з цим коефіцієнт дифузії ЕДН-покриттів, який залежить від параметрів зовнішніх енергетичних впливів і від характеристик пористості можна представити як:

$$D_M = D_m \times \left(\left\{ \Pi_k^i \right\}_{i=1, \dots; k=1, \dots}; \left\{ \theta_j \right\}_{j=1, \dots} \right) \quad (9)$$

де D_m – коефіцієнт переносу маси; Π_k^i – параметри енергетичних впливів під час технологічної модифікації; θ_j – змінні, що описують пористість покриття; i, j, k – індекси.

Оскільки в загальному випадку встановлення залежності типу (9) є відкритою проблемою, тому було запропоновано наступне уявлення коефіцієнта переносу маси у вигляді лінійного адитивного розкладання в ряд по основним змінним:

$$D_M = D_m \sum_{i,k} C_{i,k} \Pi_k^i + \sum_j A_j \theta_j \quad (10)$$

де $C_{i,k}, A_j$ – емпіричні коефіцієнти.

В постановці завдання управління дифузним насиченням ЕДН-покриттів важливим є вибір критерію (функціоналу), згідно якому буде прийнято встановлення оптимального рішення. У роботі в якості критерію оптимальності пропонується глибина насичення напиленого шару азотом:

$$L \rightarrow \max \quad (11)$$

З урахуванням залежності функціонала (11) від параметрів пористості ЕДН-покриття і зовнішніх енергетичних впливів отримаємо залежність (12) у вигляді:

$$L = L \times \left(\left\{ \Pi_k^i \right\}_{i=1, \dots; k=1, \dots}; \left\{ \theta_j \right\}_{j=1, \dots} \right) \quad (12)$$

Таким чином, завдання управління дифузним насиченням ЕДН-покриттів в умовах ПА зводиться до виразу, яке буде мати вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Pi_k^i \\ L = L \left(\left\{ \Pi_k^i \right\}_{i=1, \dots; k=1, \dots}; \left\{ \theta_j \right\}_{j=1, \dots} \right) \end{array} \right. \rightarrow \max \quad (13)$$

Рішення завдання (13) проводити за допомогою розкладу функціоналу (11) в

системі базисних функцій P_k^i за допомогою методу Галеркіна або за допомогою численних наближень з використанням методу градієнтного спуску на основі модельних або розширених уявлень.

Побудовані співвідношення дозволяють управляти дифузним насиченням ЕДН – покриттів в умовах ПА для підвищення твердості, зносостійкості, експлуатаційних властивостей та ресурсу деталей ЗТ.

У п'ятому розділі представлені результати досліджень впливу параметрів комбінованого методу формування багатофункціональних покриттів на комплекс фізико-механічних та експлуатаційних властивостей відновлюваних деталей ЗТ, виконана оптимізація процесів, які є складовою комбінованого способу відновлення.

Критерієм якості ЕДН – покриттів є пористість покриттів і їх міцність зчеплення з відновлюваною поверхнею. Пористість і міцність зчеплення залежать від технологічних параметрів процесу ЕДН: витрат і тиску робочих газів, складу горючої суміші, кількості дроту, що подається в одиницю часу, дистанції напилювання, тощо. Так, міцність зчеплення покриттів при розпиленні матеріалу покриття продуктами згорання пропано – повітряної суміші в 1,8 – 2,2 рази перевищує міцність зчеплення покриттів, отриманих при розпиленні повітрям. Пористість поверхонь, відновлених покриттями, при їх розпиленні повітрям дорівнює 10 – 14 %, а при їх розпиленні продуктами згорання пропано-повітряної суміші 2 – 4 %, відповідно, тобто зменшуються в 2 – 3 рази (табл. 4).

Таблиця 4

Пористість ЕДН-покриттів

Пористість покриттів, %	ЕДН повітрям	ЕДН продуктами згорання пропано-повітряної суміші
Мінімальна	12,053	4,125
Максимальна	25,424	6,987
Середня	18,378	5,606

Основний вплив на пористість і адгезію покриттів надає дистанція напилення (рис. 7, табл. 5), температура і розмір (рис. 8) розпилюємих частинок.

Таблиця 5

Міцність зчеплення покриттів в залежності від дистанції напилення

Властивості	Відстань від сопла до поверхні деталі, мм						
	30	50	75	100	120	200	300
Міцність зчеплення, МПа	80	100	90	110	120	70	60
Зміст оксидів в покритті, %	10	12	13	15	16	25	30

Найбільша щільність ЕДН-покриттів з дротів 40Х13, Х18Н10Т досягається при дистанції напилення 110 – 120 мм (рис. 6). Практичний досвід нанесення покриттів ЕДН свідчить про те, що їх міцність зчеплення залежить від мікроструктури та розміру частинок, що розпилюються (рис. 7). Для ЕДН-покриттів міцність зчеплення прямо пропорційна їх пористості (табл. 6). Дослідження показали

вплив розміру частинок, що розпилюють, на пористість і адгезію покриттів (рис. 7). У покриттів із сталевих дротів 40X13 і X18H10T спостерігається зниження адгезії зі збільшенням пористості, а ніхром X20H80 не підкоряється цьому правилу (рис. 7).

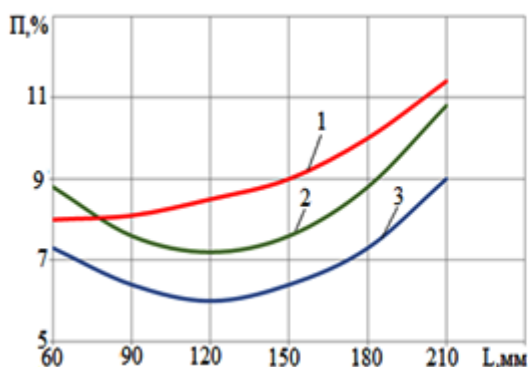


Рис. 6. Залежність пористості від дистанції напилення: 1 - 40X13; 2 - 12X18H10T; 3 - X20H80

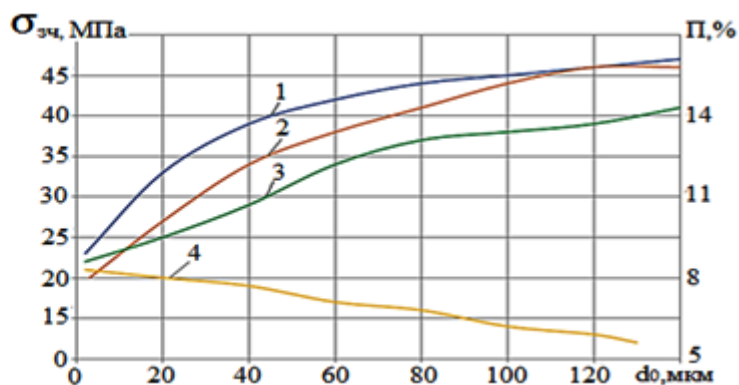


Рис.7. Залежність міцності зчеплення і пористості від розміру розпилюємих частинок зі сталей 40X13 (1); X18H10T (2,3) і X20H80 (4)

Пористість покриттів в діапазоні 5 – 14 % впливає позитивно на міцність зчеплення, а її збільшення понад 14% призводить до зниження адгезії (табл. 6).

Таблиця 6

Вплив пористості на міцність зчеплення напилених покриттів

Матеріал покриття	Міцність зчеплення (МПа) при різній пористості (%)					
	≤ 4	5 – 9	7 – 10	10 – 14	12 – 16	13 – 17
40X13	38	49	61	53	40	36
X18H10T	37	43	55	47	43	35
X20H80	41	55	67	63	50	39

Процес ЕДН не дозволяє отримувати покриття зі сталей підвищеної твердості і зносостійкості через вигоряння вуглецю і легуючих елементів. Ефективним вирішенням завдання підвищення експлуатаційних характеристик відновлюваних поверхонь деталей ЗТ ЕДН-покриттями зі сталей є формування в них високоміцних поверхневих шарів з багатошаровою структурою шляхом їх обробки ПА.

Обробка ПА забезпечує формування нітридів з підвищеною твердістю. Мікротвердість модифікованих азотом напилених шарів становить від 5600 до 12000 МПа (табл. 7). Змінюючи температуру процесу ПА можна регулювати мікротвердість (табл. 7, рис. 8, а) і глибину дифузійного шару (рис. 8, б) ЕДН-покриття. Мікротвердість модифікованого напиленого шару ЕДН – покриття в результаті обробки ПА при 750 – 820 К досягає значень 11000 – 12000 МПа (табл. 7).

Таблиця 7

Вплив температури ПА на мікротвердість ЕДН-покриттів

Матеріал покриття	Мікротвердість, ГПа при температурі азотування, К						
	700	720	750	770	800	820	870
Сталі мартенситного класу	8,6	11,3	12,9	14,0	15,9	12,7	11,3
Сталі аустенітного класу	5,6	6,2	8,0	8,9	11,1	12,0	11,8

Суттєвий вплив на мікротвердість поверхні азотованого шару ЕДН-покриття (рис. 8, а) та товщину дифузійного шару має тиск (рис. 8, б) і склад реакційного газу. Щодо впливу на мікротвердість азотованого шару складу реакційного газу встановлено, що максимальних значень вона досягає за умови використання суміші $90\%N_2+5\%C_3H_8+5\%Ar$, а мінімальних значень – при суміші $80\%N_2+5\%C_3H_8+15\%Ar$ (рис. 8,а).

Мікротвердість поверхневих шарів ЕДН-покриттів після обробки ПА досягає значень від 8500 до 11000 МПа при температурі азотування $550 - 600\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 8, а) і тиску реакційного газу $200 - 230\text{ Па}$ (рис. 9, а). Згідно отриманим результатам (рис. 8, б, рис. 10) при збільшенні температури ПА ЕДН – покриттів збільшується глибина модифікованого шару (до 300 мкм).

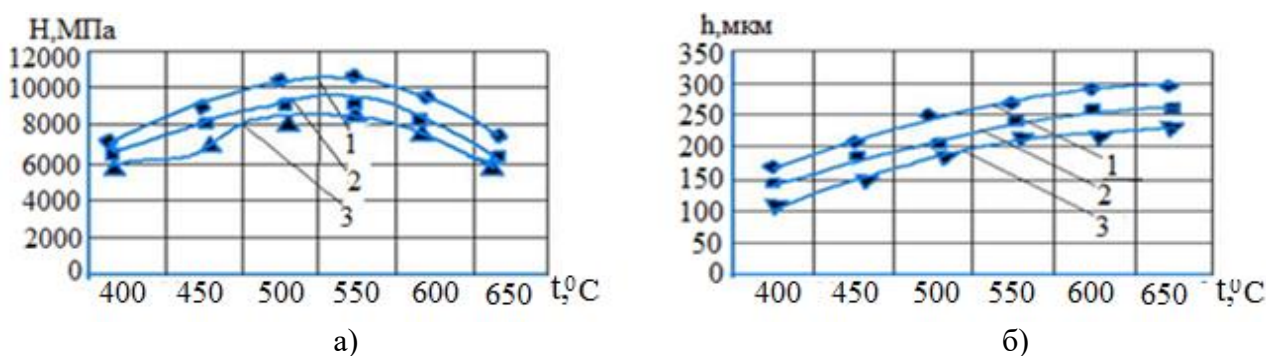


Рис. 8. Залежність мікротвердості ЕДН-покриттів (а) і товщини дифузійного шару (б) від температури азотування: а) 1 – $90\%N_2+5\%C_3H_8+5\%Ar$; 2 – $95\%N_2+5\%C_3H_8$; 3 – $80\%N_2+5\%C_3H_8+15\%Ar$ при $P = 150\text{ Па}$ та $t = 3\text{ год.}$; б) 1 – $P = 200\text{ Па}$; 2 – $P = 150\text{ Па}$; 3 – $P = 75\text{ Па}$ при $90\%N_2+5\%C_3H_8+5\%Ar$ та $t = 3,5\text{ год.}$

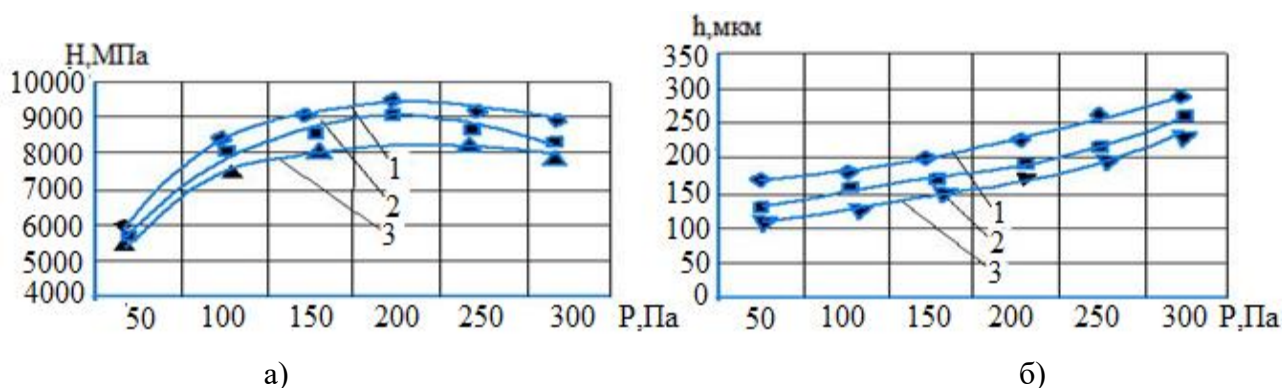


Рис. 9. Залежність мікротвердості азотованих поверхонь ЕДН-покриттів (а) і товщина дифузійного шару (б) від тиску реакційного газу: а) $T = 500\text{ }^\circ\text{C}$; $90\%N_2+5\%C_3H_8+5\%Ar$; 1 – $t = 1\text{ год.}$; 2 – $t = 2\text{ год.}$; 3 – $t = 2,5\text{ год.}$ б) $T = 550\text{ }^\circ\text{C}$; $80\%N_2+5\%C_3H_8+15\%Ar$; 1 – $t = 3\text{ год.}$; 2 – $t = 2,5\text{ год.}$; 3 – $t = 2\text{ год.}$

В результаті триботехнічних випробувань (тиск $0,64\text{ МПа}$, сухе тертя) ЕДН-покриттів після різних режимів їх обробки ПА визначено, що підвищення температури ПА ЕДН-покриттів зі сталі 40X13 різко збільшує їх зносостійкість. ПА ЕДН-покриттів зі сталі 40X13 при $500 - 520\text{ К}$ не супроводжується зростанням зносостійкості поверхні. Більш високу зносостійкість мають ЕДН – покриття після їх обробки ПА при $670 - 770\text{ К}$ (рис. 11). При переході до більш високих температур ($670, 720$ і 770 К) зносостійкість покриттів істотно зростає. Підвищена

зносостійкість азотованого при 770К шару ЕДН – покриття обумовлена його глибиною і рівнем мікротвердості.

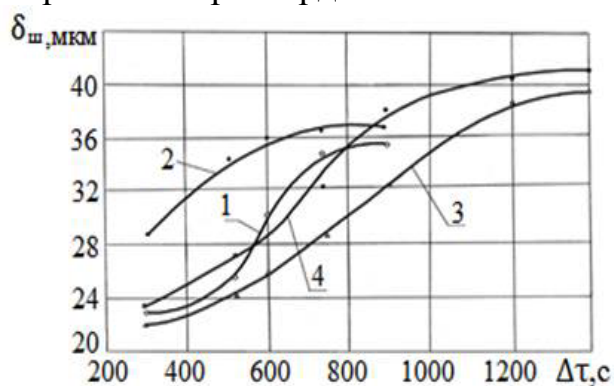


Рис. 10. Залежність товщини азотованого шару ЕДН-покриття від часу ПА: 1,2 – 40X13 (680 – 710 К); 3,4 – X18N10T (650 – 680 К)

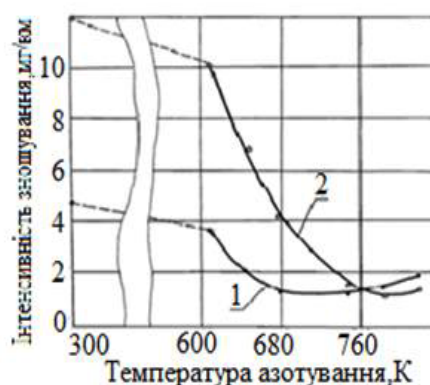


Рис. 11. Вплив температури ПА на інтенсивність зносу ЕДН-покриття: 1 – 40X13; 2 – X18N10T

Підвищення надійності деталей ЗТ шляхом управління властивостями відновлюваних поверхонь є кінцевою метою процесу їх відновлення комбінованим методом нанесення ЗЗП. Розробка комбінованого методу нанесення ЗЗП пов'язана з рішенням оптимізаційних завдань, а ефективно його використання базується на можливості управління параметрами нанесення ЗЗП, що забезпечить максимальну міцність і довговічність відновлюємих деталей при мінімальній вартості. Таким чином, питання оптимізації займають ключове місце в ремонті при відновленні деталей ЗТ.

Зважаючи на складність фізико-хімічних процесів, що відбуваються при нанесенні ЗЗП, в даний час не існує аналітичних залежностей, які б їх описали. Тому вирішення завдання з побудови математичної моделі комбінованого способу нанесення ЗЗП проводилося за такими етапами: формалізація завдання, конструювання плану експерименту, проведення експерименту, статистичний аналіз результатів експерименту, побудова математичної моделі, аналіз якості моделі, проведення розрахункового експерименту, формування рекомендацій.

Ефективність прийнятих оптимізаційних рішень залежить від правильності вибору критеріїв, за якими буде оцінюватися працездатність відновленої деталі у заданих умовах експлуатації. Це пояснюється тим, що значна кількість технологічних параметрів у сполученні із широкою номенклатурою матеріалів для підвищення надійності деталей ЗТ дає широкий ряд альтернативних варіантів. У такій ситуації ефективність прийнятих рішень буде залежати від наявності необхідних критеріїв оцінки працездатності деталей ЗТ із покриттями у заданих умовах експлуатації.

На основі використання методів експертних оцінок і результатів серії відсіваючих експериментів визначено критерії оптимізації: 1) для ЕДН-міцність зчеплення і пористість; 2) для ПА напилених покриттів - зносостійкість (інтенсивність зношування) і межа витривалості.

Для математичного моделювання була визначена група керованих факторів, що впливає на величину критеріїв оптимізації (табл. 8, табл. 9). Для ЕДН в якості керованих факторів, що впливають на пористість і міцність зчеплення,

використовували напругу, дистанцію напилення, діаметр дроту, товщину покриття (табл. 8).

Таблиця 8

Фактори та рівні їх варіювання для ЕДН

Фактор	Позначення	Рівні варіювання							
		28	29	30	31	32	33	34	
Напруга дуги, U В	X ₁	28	29	30	31	32	33	34	
Дистанція напилення L _н мм	X ₂	100	120	140		160	180	200	
Діаметр дроту (d _{др}), мм	X ₃	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	
Товщина покриття (h), мм	X ₄	0,5	1,0	1,5		2,0	2,5	3,0	
Навантаження Р МПа	X ₅	2,0	3,5	5,0	6,5	8,0	9,0	10,0	
Швидкість ковзання V м/с	X ₆	2,0	2,15	2,3		2,45	2,6	2,75	

Відповідно до отримання якісних покриттів і необхідних експлуатаційних властивостей відновлюваних поверхонь міцність зчеплення повинна бути не менше 80 – 100 МПа, а пористість не перевищувати 6 – 8 %.

Для ПА напилених покриттів, які впливають на інтенсивність зношування і межу витривалості, були вибрані: час дифузійного насичення, тиск і склад реакційного газу, температура дифузійного насичення і експлуатаційна температура (табл. 9).

Таблиця 9

Фактори та рівні їх варіювання для ПА напилених покриттів

Фактори	Позначення	Рівні варіювання									
		90	120	150		180		210		240	
Час дифузійного насичення, хв.	X ₁	90	120	150		180		210		240	
Тиск реакційного газу, Па	X ₂	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250
Склад реакційного газу, %	X ₃	95%N ₂ + 5% C ₃ H ₈			90%N ₂ + 5%C ₃ H ₈ + +5%Ar			80%N ₂ +5%C ₃ H ₈ + + 15%Ar			
Температура процесу, К	X ₄	673			773			873			
Швидкість ковзання, м/с	X ₅	0,4			0,7		1,0		1,3		
Навантаження, МПа	X ₆	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0	22,5	25,0

За результатами експерименту проведено статистичний аналіз і побудовані регресійні моделі залежності критеріїв оптимізації, які характеризують пористість, міцність зчеплення, інтенсивність зношування і межу витривалості системи «покриття-відновлена поверхня» від керованих факторів (табл. 8, табл. 9).

$$Y_1 = 3,16573 + 2,47582x_3^2 - 2,06321x_2^3 + 0,52674x_1^3 x_2 - 0,82591x_1^3 + 0,293672x_2^3 x_3^2 - 1,51418x_1^2 x_2^2 - 1,52482x_3^3 - 0,83517x_1^3 x_2^2 - 1,84718x_2 x_3^3 - 1,65074x_2^2 + 1,15314x_2^2 x_3^3 \quad (14)$$

де Y₁ – математична модель в кодованих значеннях для пористості напилених покриттів;

$$Y_2 = 92,5337 - 14,3728x_1 + 8,9652x_2 - 4,8754x_3 - 17,1469x_4 - 3,7426x_5 - 16,1259x_6 - 17,07341x_2x_6 - 22,2357x_3x_6 - 9,8734x_4x_6 + 1,6274x_5x_6 \quad (15)$$

де Y₂ – математична модель в кодованих значеннях для міцності зчеплення системи «покриття-відновлена поверхня»

$$Y_3 = 1,78685 + 5,3214x_2x_5 + 0,6543x_3^2x_6^3 - 2,1564x_5 + 1,8547x_5^2 + 1,8378x_2x_5^3 + 2,2579x_1^2x_3 + 1,5698x_3^3x_5^5; \quad (16)$$

де Y_3 – математична модель в кодованих значеннях для інтенсивності зношування відновлених поверхонь з ЕДН-покриттям після їх обробки ПА.

$$Y_4 = 653,175 - 106,085x_5 + 30,317x_2^2x_5 - 15,324x_2 + 32,759x_1x_4^2 - 21,123x_4^2, \quad (17)$$

де Y_4 – математична модель у кодованих значеннях для межі витривалості відновлених поверхонь.

Математичні моделі процесу побудовані шляхом використання методу випадкового пошуку на основі ЛПт рівномірно розподілених випадкових точок, Розрахунок моделей здійснювався за допомогою пакета прикладних програм ППП ПРІАМ "Планування, регресія і аналіз моделей», теорії планування експерименту і математичної статистики.

Залежності (14 – 17), перевірені на адекватність, відтворюваність і інформативність результатів за критеріями математичної статистики.

Отримані регресійні залежності (14 – 17) використовували для оптимізації процесу ремонту деталей ЗТ комбінованим методом нанесення ЗЗП. На основі отриманих результатів і за допомогою пакету прикладних програм (ППП) ПРІАМ одержані наочні уявлення про геометричний образ функції відгуку і побудовані відповідні геометричні поверхні функції відгуку (рис. 12, 13). Отримані математичні моделі описують залежності інтенсивності зношування, межі витривалості, міцності зчеплення і пористості від параметрів процесу нанесення ЗЗП та можуть бути використані для оптимізації технологічного процесу відновлення деталей ЗТ.

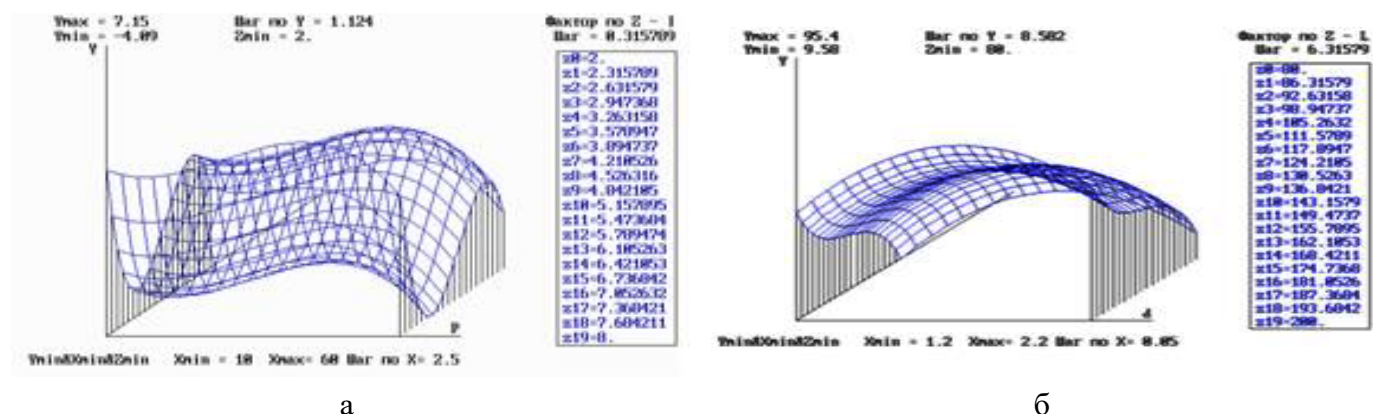


Рис. 12. Функції відгуку пористості (а) та міцності зчеплення (б) від дистанції напилення, діаметра дроту, напруги та навантаження

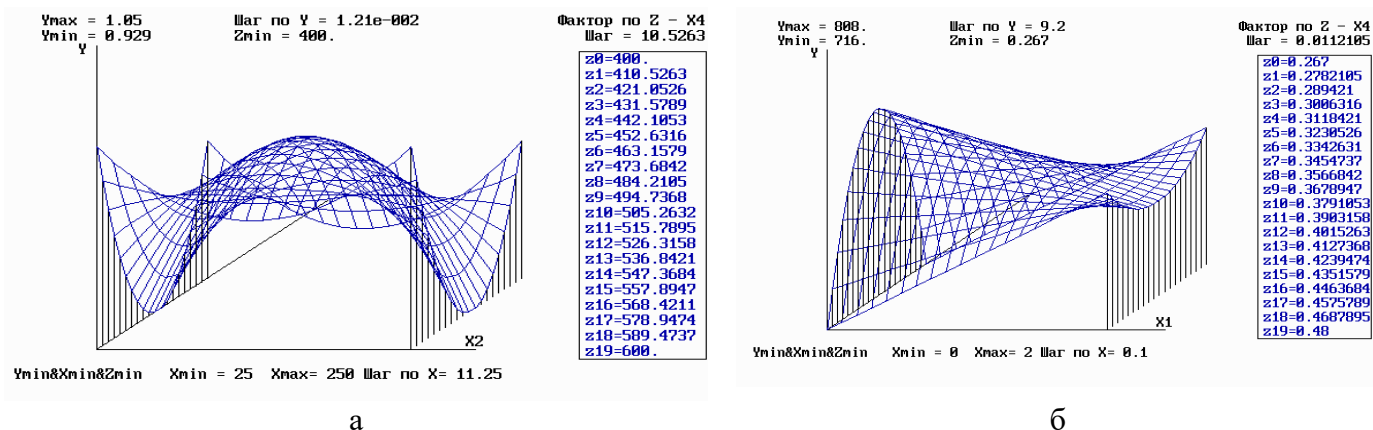


Рис. 13. Функції відгуку інтенсивності зношування та межі витривалості від часу дифузійного насичення, тиску та температури газу

У шостому розділі представлені результати досліджень властивостей поверхонь, відновлених комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів, розроблені дослідно-експериментальна технологія та технологічні інструкції для відновлення деталей на прикладі валу розподільного дизель-генератора і валу насосу.

При відновленні деталей комбінованим методом на її поверхні утворюється шар покриття (рис. 14), властивості якого залежать від кількісних і якісних характеристик фізико-хімічних процесів при відновленні і їх взаємодій: повітряного потоку з розплавом дроту і утворенням струменя розпилених частинок; перетворення кінетичної енергії руху розпилених частинок в роботу деформації при їх механічному контакті з відновлюваною поверхнею і передача внутрішньої (теплової) енергії від частинок до деталі.

Покриття утворюється шляхом розплавлення дроту і формування частинок в умовах їх інтенсивної взаємодії з розпилюючим факелом, а також подальшого укладання розплавлених крапель на відновлювану поверхню. В шарі напиленого покриття, що в процесі ЕДН був сформований, протікають процеси кристалізації, деформації та відпуску. Тому стан структури і властивості покриттів залежать від поєднання параметрів процесу напилення. Частинки матеріалу дроту, що розпилюються піддаються окисленню, в результаті чого до моменту зіткнення з відновлюваною поверхнею на них формується окисна плівка. У напилених покриттях вміст кисню можна оцінити якісно при дослідженні їх мікроструктури. Результати металографічного аналізу також свідчать про збереження плівок оксидів в модифікованому покритті зі сталі 40X13. На мікрошліфах оксиди видно у вигляді довгастих темних або сірих ділянок, а пори - чорних (рис. 14).

Структура відновлених поверхонь з покриттів відрізняється не тільки пористістю, але і фазовим складом. Дослідження показали (дифрактометр ДРОН-3.0, монохроматизоване CoK_α випромінювання, $V=30$ кВ, $I=10$ мА), що фазовий склад відновлених поверхонь з ЕДН-покриттям покриттям включає: α -фазу (мартенсит), γ -фазу (аустеніт), окисли Fe_3O_4 , $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ і Cr_2O_3 . Відмінною особливістю відновлених поверхонь з ЕДН-покриттями є присутність в них аномально великої кількості залишкового аустеніту (до 30 об.%). Причиною появи «аустенітного ефекту» в покриттях є більш висока концентрація в них легуючих елементів (хрому і вуглецю) за рахунок повного розчинення карбідів хрому при розплавленні дроту і насичення крапель розплаву вуглецем з полум'я пропану.

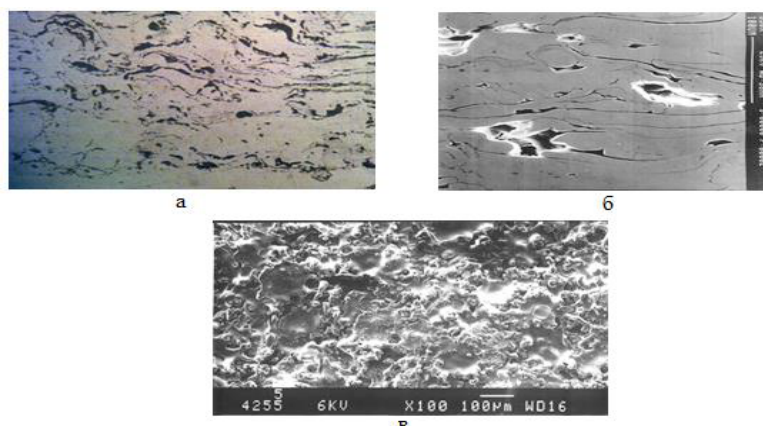


Рис. 14. Мікроструктура (а, б) і мікротопографія (в) ЕДН-покриття зі сталі 40X13

Одною з основних вимог, яким повинні задовольняти відновлювані поверхневі шари деталей трибосполучень є висока твердість і зносостійкість. Виконання цієї умови стосовно до сталей можливо у випадку, коли в сталях сформована двофазна структура, яка містить метастабільний аустеніт, який має твердість 200 – 300 HV. В процесі приробітку метастабільний аустеніт трансформується в зносостійкий і твердий мартенсит (600 – 700 HV) за рахунок протікання деформаційного $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення. Режими ЕДН дозволяють забезпечити формування в покритті великої кількості метастабільного аустеніту, який в процесі роботи трибосполучень переходить в мартенсит. Для забезпечення в структурі напиленого покриття метастабільного аустеніту, необхідно досягти певних умов формування покриття: температури нагріву дроту і його розпилення, швидкості охолодження розплавлених частинок і ступеня їх окислення, що призводять до зміни концентрації легуючих елементів. У сталей 40X13 температура знаходиться в межах 550 – 700 К. При розпилюванні дротів з цих сталей встановлено, що об'ємний вміст метастабільного аустеніту досягає 45 %, якщо температура нагріву дроту не перевищує 2000 К. У сталей X19H10T температура мартенситного перетворення становить 70 – 110 К, тому структура цих сталей характеризується високою стійкістю і вони отримали назву сталей аустенітного класу.

Застосування комбінації ЕДН і ПА відкриває великі можливості в відновленні деталей ЗТ композиційними покриттями з особливими властивостями. Насичення азотом ЕДН-покриттів зі сталі мартенситного класу і аустенітного класів призводить до утворення модифікованого поверхневого шару товщиною 50 – 90 мкм та мікротвердістю 10000 – 12000 МПа. Після обробки ПА відновлених поверхонь з ЕДН-покриттям зі сталі 40X13 і 18XН10Т формується композиційна структура (рис. 15), яка представляє собою сталеву матрицю із твердими нітридами, поява яких обумовлена інтенсивною дифузією по границям ламелів (конгломератів деформованих частинок розпилюємого дроту).

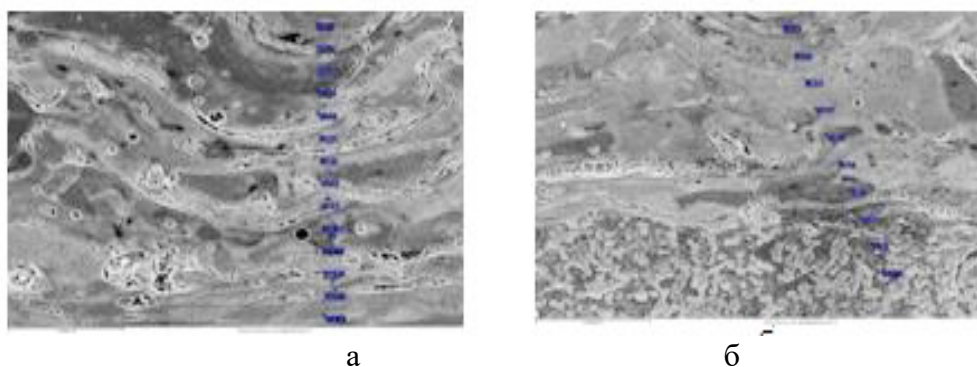


Рис. 15 . Мікроструктура покриттів, отриманих комбінованим методом :
а) сталь 40X13; б) сталь X18H10T

На етапі триботехнічних випробувань оцінювалася зносостійкість відновлених поверхонь з покриттями в умовах сухого тертя ковзання при нормально прикладеному навантаженню величиною в 10 Н і швидкості ковзання 0,2 м/с (рис. 16). Азотований шар на ЕДН-покритті мав найменшу інтенсивність зношування, а ЕДН – покриття характеризувалося більшою швидкістю зношування.

Вимірювання мікротвердості показало, що дюрOMETричні властивості відновлених поверхонь з покриттями змінюються відповідно до триботехнічних.

Для порівняння зносостійкості були випробувані зразки відновлених поверхонь із ЕДН – покриттями і зразки поверхонь з азотованими ЕДН-покриттями. Інтенсивність зносу напилених зразків при сухому терті складала 320 – 400 мкм/км, що в 2 і більш раз перевищує інтенсивність зносу зразків з азотованим ЕДН-покриттями. Найбільший знос присутній в поверхневому шарі, який має максимальну кількість мікро- і макродефектів (пор), відносно низьку величину мікротвердості. Інтенсивність зношування зразків з ЕДН-покриттями після азотування зменшується до 250 мкм/км. Порівняльні триботехнічні випробування були проведені для ЕДН-покриттів, отриманих з частинок розміром 20 – 40 мкм (режим 2, розпилення сумішшю пропану і повітря при надлишку пропану) і 5 – 20 мкм (режим 4 при розпиленні повітрям) зі сталі 40X13 (рис. 17).

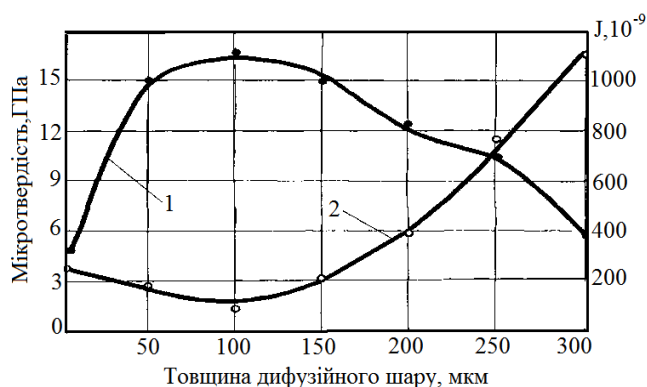


Рис. 16. Мікротвердість і зносостійкість азотованого шару на ЕДН – покритті зі сталі 40X13: 1 – мікротвердість; 2 – інтенсивність зношування

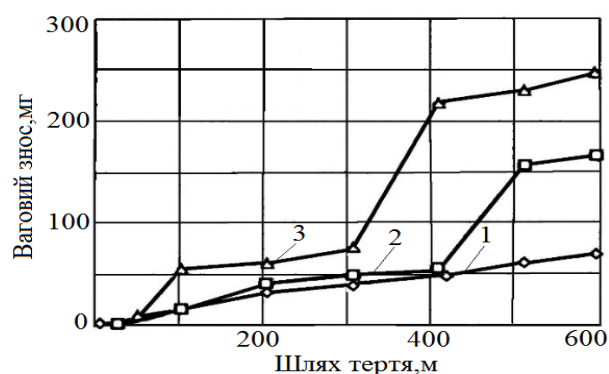


Рис. 17. Залежність зносу ЕДН – покриття зі сталі 40X13 після ПА від шляху тертя без змащення (1,5 МПа, контртіло із загартованої сталі 60): 1 – літа сталь 40X13; 2 – покриття із часток 20 - 40 мкм; 3 – покриття з часток 5 - 20 мкм

Аналіз графіків показує, що крива зносу відпущеної сталі має характерну стадію приробітки і ділянку сталого зношування з близькою до лінійної залежності вагового зносу від шляху тертя. Для ЕДН-покриттів стадії сталого зношування періодично змінюються стадіями прискореного зношування, тобто зношування ЕДН-покриттів носить виражений циклічний характер (рис. 18). Найбільша середня величина інтенсивності вагового зносу становила 0,41 мг/м (табл. 10).

Таблиця 10

Значення інтенсивності зношування і коефіцієнта сухого тертя для ЕДН-покриттів і відпущеної литої сталі 40X13 після ПА

Режим обробки	Інтенсивність зношування, мг/м	Коефіцієнт тертя
Лита сталь 40X13	0,11	0,80 – 0,92
ЕДН-покриття	0,28	0,85 – 0,95
ЕДН-покриття	0,41	0,95 – 1,05

На стадії сталого зношування інтенсивність зношування покриттів з частинок розміром 20 - 40 мкм мало відрізняється від литої сталі. Причиною цього є висока в'язкість руйнування покриття, які мають аустеніт, а також зміцнення покриттів за рахунок мартенситного γ - α перетворення. Інтенсивність зношування ЕДН-покриттів

зі сталі 40X13 без обробки ПА при сухому терті знижується з $I_h=250$ мкм/км до $I_h=19$ мкм/км після обробки ПА. Узагальнені результати триботехнічних випробувань показали, що зносостійкість ЕДН-покриттів зі сталі 40X13 після обробки ПА підвищується в 2 і більше рази (рис. 18,а). Після прискорених триботехнічних випробувань зразків із азотованими напиленими покриттями з дротяної сталі 40X13 протягом 9 годин не виявлено помітного зношування (рис. 18, б).

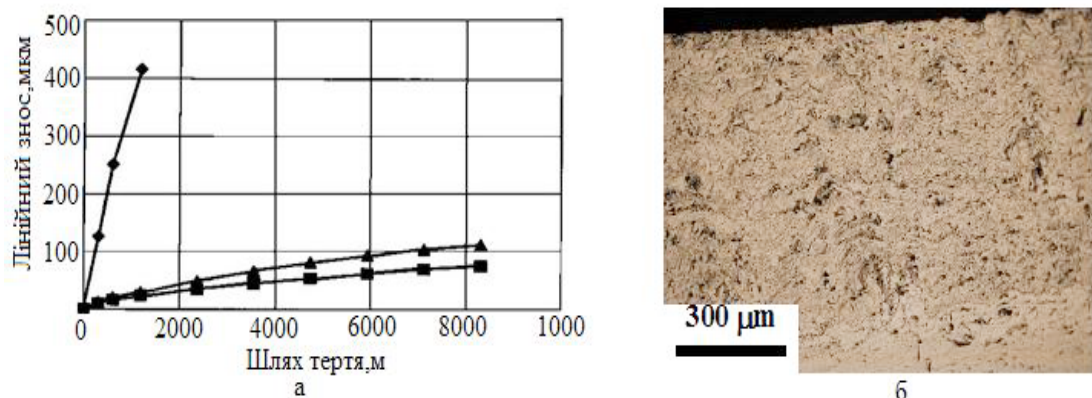


Рис. 18. Залежність лінійного зносу від шляху сухого тертя (а) та структура азотованого ЕДН – покриття після 9 годин випробувань (б): ◆ – ЕДН-покриття зі 40X13; ■ – ЕДН – покриття зі сталі 40X13+ПА; ▲ – лита сталь 45+гартування+відпуск

На основі проведених досліджень розроблені практичні рекомендації щодо використання комбінованої технології відновлення шляхом нанесення покриттів на ремонтних підприємствах України. Розроблена технологія була апробована при відновленні валу СДГ, валу СН та інших деталей ЗТ на створеній експериментальній дільниці (рис. 19).



Рис. 19. Дільниця відновлення деталей ЗТ (а, б), процес ЕДН (в) і ПА (г); відновлені деталі: вал СДГ (д), вал СН (е), розподільний вал (ж), колінчастий вал (з) палець поршневий (к)

Технологічний процес відновлення деталей ЗТ комбінованим методом складається з наступних операцій: підготовка матеріалів для покриттів, миття і очищення відновлюваної деталі, дефектація деталі, попередня механічна обробка, електроіскрова обробка, контроль поверхонь після ЕЮ, ЕДН, контроль поверхонь після ЕДН, механічна обробка відновлених поверхонь, контроль відновлених поверхонь, обробка ПА, контроль відновлених поверхонь після ПА, консервація виробів для зберігання.

Проведені лабораторні та стендові випробування валів СДГ і СН показали, що зносостійкість відновлених поверхонь в 2,5 – 5 рази вище, ніж поверхонь, відновлених за традиційною технологією ЕДН і в 1,5 – 1,7 рази – у порівнянні з новими валами. Термін служби відновлених валів збільшився в 2 – 2,5 рази в порівнянні з новими деталями і деталями, отриманими ЕДН.

ВИСНОВКИ

У дисертації виконано теоретичне і експериментальне вирішення наукової проблеми забезпечення надійності деталей ЗТ шляхом застосування багатофункціональних покриттів, нанесених комбінованим методом в процесі ремонту. Результати досліджень дозволили сформулювати основні теоретичні та науково-практичні висновки:

1. Проведена комплексна оцінка номенклатури деталей ЗТ, які визначають їх ресурс, показала, що зношення домінує над усіма іншими видами руйнувань, а саме, близько 51 % деталей мають знос та 49 % – комбінації інших видів зношень та руйнувань поверхневого шару (корозія, контактні ушкодження, деформації, відшаровування, тощо). Серед них 53 % припадає на циліндричні деталі, а 47 % на інші види деталей. Аналіз ефективності реалізацій існуючих шляхів відновлення деталей ЗТ показав, що вони мають низку недоліків і не забезпечують експлуатаційну надійність.

2. Запропоновано концепцію забезпечення надійності відновлюваних деталей ЗТ, яка полягає в забезпеченні надійності деталей ЗТ та їх елементів в процесі ремонту шляхом використання багатофункціональних покриттів, визначенні раціональні режими комбінованого методу нанесення багатофункціональних покриттів та управління ресурсом деталей ЗТ на основі впливу факторів управляючої дії. Реалізація концепції базується на використанні системного підходу, аналізу матеріалів, особливостей конструкцій обладнання, режимів обробки на етапах процесу ремонту, основних статистичних та математичних методах, експериментальних дослідженнях.

3. Для дослідження структурних і морфологічних особливостей поверхонь після електроіскрового легування запропоновано метод кількісного стереофрактографічного аналізу за допомогою якого встановлено, що адгезійна і когезійна міцність напилених покриттів збільшується в 1,5 – 2 рази.

4. Встановлено взаємозв'язок параметрів ЕДН (дистанції напилення, складом і властивостями несучого середовища і матеріалу, що напилюється) з фізико-механічними і експлуатаційними властивостями відновлюваних поверхонь. Дистанція напилення склала 80 – 150 мм при коефіцієнту надлишку повітря

$\alpha = 1,0 - 1,1$, швидкість частинок становить 150 – 190 м/с (окислювальна атмосфера), 400 – 500 м/с (відновлювальна атмосфера) діаметр дроту – 1,6 – 1,8 мм, тиск стисненого повітря – 0,4 МПа; тиск пропан – бутану – 0,37 МПа. Саме ці параметри забезпечили отримання покриттів пористістю не більше 6 – 8 % і міцністю зчеплення не менше 100 МПа.

5. Розроблено метод управління ресурсом деталей засобів транспорту та їх елементів на основі впливу факторів управляючої дії при формуванні багатофункціональних покриттів в результаті використання комбінованого способу нанесення.

6. Встановлено вплив модифікуючої дії ПА на фізико – механічні та експлуатаційні властивості покриттів, отриманих ЕДН. Доведено, що рівень властивостей сталевих покриттів, отриманих ЕДН (мікротвердість, зносостійкість), контролюється ступенем насичення мартенситної $\alpha - \text{Fe} (\text{M})$ і аустенітної $\gamma - \text{Fe} (\text{A})$ – фаз азотом. Ефект суттєвої інтенсифікації механізму насичення сталевих покриттів, отриманих ЕДН, азотом обумовлений їх структурними особливостями, що дозволило визначити умови, які забезпечують підвищення мікротвердості поверхневих шарів на покриттях з сталей мартенситного класу і аустенітного класу – до 12000 МПа.

7. Встановлено, що інтенсивність зношування покриттів отриманих ЕДН зі сталі 40X13 при сухому терті знижується з $I_h = 250$ мкм/км без обробки ПА до $I_h = 19$ мкм/км після обробки ПА. На стадії сталого тертя інтенсивність зношування покриттів отриманих ЕДН після обробки ПА зменшується до $I_h = 5 - 6$ мкм/км. При цьому зносостійкість покриття отриманого ЕДН зі сталі 40X13 після обробки ПА в 1,6 рази вище зносостійкості, сталі 45 в термічно зміцненому стані.

8. У процесі експериментальних досліджень при випробуваннях дослідної партії деталей з нанесеним комбінованим способом багатофункціональним покриттям, визначено, що зносостійкість відновлених поверхонь ЕДН – покриттів зі сталей 40X13 після ПА підвищилася в 2 – 2,5 рази. Обробка відновлюваних поверхонь ЕІЛ і одночасним нанесенням підшару ніхрому і розпилювання матеріалу покриття сумішшю пропану і повітря підвищує міцність зчеплення напилених покриттів до 8 – 110 МПа. Щільність напилювання складала 95 – 96 %. Товщина покриттів – від 0,5 до 3 мм. Термін служби деталей збільшився в 2,5 – 3 рази. Найбільш високу зносостійкість мають напилені покриття зі сталі 40X13 при температурі імпульсного іонного азотування 670 – 770К. Підвищена зносостійкість азотованого покриття при температурі 770 К обумовлена його глибиною від 50 до 90 мкм і високим рівнем мікротвердості від 6500 до 12000 МПа.

9. Розроблені рекомендації щодо практичного використання теоретичних та експериментальних досліджень у запропонованій технології на прикладі колінчастого валу 164.02.000 дизель – генератора 6ЧН12/14, розподільного валу 962.03.131 дизель – генератора 4Ч10,5/13, розподільного валу 150.03.022 – 1 дизель – генератора 6ЧН 12/14 методом ЕДН дроту марки 40X13 та X18H10T (діаметр дроту 1,6 мм) з послідуєчим ПА в умовах ДП «Палада» (м. Херсон).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. М.С. Агєєв, І. В. Грицук, Е.К. Солових Застосування комбінованих технологій відновлення для підвищення ресурсу деталей засобів транспорту *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту (УкрДУЗТ)*, 2020, Вип. 194.С. 81 – 92.

2. М.С. Агєєв, А.В. Рудковський, О.П. Грищенко, Е.К. Солових, С.О. Магопець Відновлення деталей засобів транспорту комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів *Науковий журнал «Вісник Хмельницького національного університету»*. Технічні науки. 2020. №3 (285). С. 268 – 277. DOI 10.31891/2307 – 5732.

3. O. Saraiev, I. Saraieva, I. Gritsuk, R. Vrublevskyi, D. Kurnosenko, M. Ahieiev Automated Diagnostic System for Engine Cylinder – Piston Group. *SAE Technical Paper 2020 – 01 – 2022*. 2020. doi: <https://doi.org/10.4271/2020 – 01 – 2022>. Mode of access: *SAE International* (Scopus). <http://papers.sae.org/10.4271/2020 – 01 – 2022>. Title from the screen.

4. M. Ageev, L. Lopata, T. Smirnova Of combined electric arc coatings. *International Scientific Journal Problems of Tribology*. 2019. Vol.24, №3/93. P. 51 – 61.

5. М.С. Агєєв, М.В. Головащук Підвищення експлуатаційних властивостей деталей засобів транспорту шляхом керування факторами процесу електродугового напилення багатофункціональних покриттів *Науковий журнал «Вісник Хмельницького національного університету»*. Технічні науки. 2019 №3(273). С. 240 – 248. DOI 10.31891/2307 – 5732.

6. I. Gritsuk, D. Pohorletsykyi, V. Mateichyk, M. Ahieiev, I. Sadovnyk Improving the Processes of Thermal Preparation of an Automobile Engine with Petrol and Gas Supply Systems (Vehicle Engine with Petrol and LPG Supplying Systems). *SAE Technical Papers*, 2020 – 01 – 2031. 2020. doi: <https://doi.org/10.4271/2020 – 01 – 2031>. Mode of access: *SAE International*. (Scopus). <http://papers.sae.org/10.4271/2020– 01 – 2031>. Title from the screen.

7. М.С. Агєєв Исследование возможности повышения качества электродуговых покрытий путем обработки импульсным ионным азатированием. Системи і засоби транспорту. Проблеми експлуатації та діагностики (протокол від 30.08. 2019 р. №1 ISBN 978 – 966 – 2245 – 53 – 0): монографія.– Херсон: ХДМА, 2019. С. 95 – 108.

8. М.С. Агєєв, М.А. Білоцерківський, В.М. Лопата, Н.В. Вігілянська Використання структурних аномалій в сталевих газотермічних покриттях при підвищенні зносостійкості засобів транспорту. *Науковий журнал «Вісник Хмельницького національного університету»*. Технічні науки. 2020, №4. Том 1 (287), С. 257 – 262. DOI 10.31891/2307 – 5732.

9. M. Ageev, S. Dovzhuk, V. Nikolaychuk The Influence of Design Parameters for Electric arc Equipment on the Factors of Spray Process and Properties of Coatings. *Central Ukrainian Scientific Bulletin*. Technical Sciences. 2019. Col.1(32). P.114 – 123.

10. E. Belousov, A. Marchenko, I. Gritsuk, Y. Kalashnikov, M. Ahieiev, S. Pronin Research of the Gas Fuel Supply Process on the Compression Stroke in Ship's Low – Speed Gas – Diesel Engines. *SAE Technical Paper* 2020 – 01 – 2107. 2020. doi: <https://doi.org/10.4271/2020 – 01 – 2107>. Mode of access: *SAE International* (Scopus). <http://papers.sae.org/10.4271/2020 – 01 – 2107>. Title from the screen.

11. М.С. Агєєв Дослідження кінетики виміру електрохімічного потенціалу в часі при підвищенні корозійної стійкості деталей Науковий журнал «Вісник Хмельницького національного університету». Технічні науки. 2019 №6 (279). С. 240 – 248. DOI 10.31891/2307 – 5732.

12. A. Golovan, I. Gritsuk, V. Popeliuk, D. Pohorletskyi, I. Khudiakov, M. Ahieiev Features of mathematical modeling in the problems of determining the power of a turbocharged engine according to the characteristics of the turbocharger. *SAE International Journal of Engines*, 2020, 13(1), 03 – 13 – 01 – 0001. doi: <https://doi.org/10.4271/03 – 13 – 01 – 0001>. Mode of access: *SAE International Journal of Engines*. (Scopus). Order URL: <http://worldcat.org/issn/19463936/>. Title from the screen.

13. М.С. Агєєв, І.В. Грицук, А.В. Рутковський, А.Є. Солових, Є. К. Катеринич Дослідження процесу імпульсного іонного вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду. Науковий журнал «Вісник Хмельницького національного університету». Технічні науки. 2020. №6 (291). С. 107 – 116 DOI 10.31891/2307 – 5732.

14. Б.А. Ляшенко, О.А. Микосянчик, М.С. Агєєв Анализ триботехнических характеристик самофлюсующихся покрытий в условиях качения со скольжением при нестационарном нагружении Науковий журнал «Технологічний аудит та резерви виробництва». Полтава: 2016. №2/1(28). С. 4 – 9.

15. Е.Е. Кожевникова, М.С. Агєєв, С.Л. Чиграй Повышение ресурса судовых насосов на основе комбинированной технологии восстановления. Збірник наукових праць «Водний транспорт» Київ: КГАВТ, 2015. Вип. №2 (24). С. 57 – 70.

16. М.С. Агєєв, Ю.В. Волков, С.Л. Чиграй Упрочняющие покрытия в судостроении и судоремонте Науковий Вісник Херсонської державної морської академії. Херсон: ХДМА, 2015. №2(13). С. 110 – 124.

17. Н.Н. Данилин, А.А. Абдулаев, М.С. Агєєв, В.И. Свиридов Вибродиагностированное ГЦН. Сборник научных трудов Национального университета ядерной энергии и промышленности. 2012 №7.С. 87 – 89.

18. Е.В. Белоусов, М.С. Агєєв, В.И. Свиридов Влияние на рабочий процесс среднеоборотного судового дизеля путём впрыскивания воды в рабочий цилиндр. Всеукраинский научно – технический журнал «Двигатели внутреннего сгорания» Харків: НТУ «ХПИ». 2011. №1. С.40 – 43.

19. Н.М. Шайтор, И.В. Плетяний, А.Н. Пинчук, М.С. Агєєв Возможные пути оптимизации виброшумовых параметров электродвигателей Збірник наукових праць Академії військово – морських сил імені П.С. Нахімова. 2011. №3(7). С.87 – 89.

20. М.С. Агєєв Застосування методів аналітичної механіки для створення моделі переміщення маси в робочих зонах елементів СЕУ. Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». Луцьк: 2013. Вип. №40. С. 4 – 6.

21. Е.В. Белоусов, М.С. Агеев, Н.Н. Кобяков Комплексная утилизация отходов сепарации топлива в судовых энергетических установках *Научно - технический журнал «Вестник двигателестроения»*. Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2011. №2. С.111 – 114.

22. А.В. Дудан, М.С. Агеев, А.В. Рутковский, В.И. Мирненко, О.В. Радько. Исследование процесса вакуумного термоциклического азотирования в плазме пульсирующего тлеющего разряда. Построение математической модели процесса *Вестник Полоцкого государственного университета*. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. Машиноведение и машиностроение. г. Новополоцк: ПГУ, 2020. №4. С. 40 – 48.

23. Т.В. Вигерина, М.С. Агеев, К.А. Данько Оценка влияния параметров газотермического напыления покрытий на их свойства путем использования методов математического планирования. *Вестник Полоцкого государственного университета*. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. Машиноведение и машиностроение. г. Новополоцк: ПГУ, 2017. №1. С. 35 – 40.

24. Ю.В. Волков, Т.В. Вигерина, М.С. Агеев Восстановление валов дизель-генераторов электроконтактным припеканием дискретных покрытий *Вестник Полоцкого государственного университета*. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. Машиноведение и машиностроение. г. Новополоцк: ПГУ, 2016. №3. С. 82 – 89.

25. М.С. Агеев, А.В. Дудан, Т.В. Ворона, Б.А. Ляшенко Применение гибридных технологий для реновации и повышения ресурса судовых машин и механизмов. *Вестник Брестского государственного технического университета. Научно – теоретический журнал Машиностроение*. Брест: БГТУ. 2015. Вип. №4(94). С. 18 – 22.

26. М.С. Агеев, Е.Е. Кожевникова, Л.А. Лопата Восстановление валов судовых насосов комбинированным способом нанесения защитных покрытий. *Науковий Вісник Херсонської державної морської академії*. Херсон: ХДМА, 2015, №2(13). С. 4 – 16.

27. Ю.В. Волков, Е.К. Солових, М.С. Агеев Сварка и родственные процессы в судостроении. *Збірник наукових праць «Водний транспорт»* Київ: КДАВТ, 2015. Вип. №2 (24). С.15 – 26

28. В.В. Сапига, А.Л. Кирюхин, Г.Ф. Романовский М.С. Агеев. Диффузия и массоперенос в системах индивидуальной смазки подшипников корабельных валопроводов на обводненном масле. *Збірник наукових праць Академії військово-морських сил імені П.С. Нахімова*. 2011. №3(7). С.148 – 157.

29. M. Ageev, V. Lyashenko, Zheng – xian Li Performance of Protective Compound Coating for NiTi Niobium Alloy. Evaluated by Thermo – Cyclic Creep Test Method. *Science Magazine Materials Protection, Periodical, Chinese (材料保护)* 2017. №50(2). С. 15 – 19

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

30. М.С. Агеев Переход от гальванической технологии к газотермическим технологиям при получении антикоррозионных покрытий. *Modern questions of productions and repair in industry and in transport: materials of the 18–th International*

Scientific and Technical Seminar (February 10 – 16, 2018, Brno, Czech Republic). Brno, Czech Republic: 2018. P. 245–249.

31. М.С. Агеев, М.Ф. Ковалев Условия эксплуатации, причины и виды износа валов двигателей внутреннего сгорания и повышение их износостойкости и срока службы. *Підвищення надійності машин і обладнання (Increase of Machine and Equipment Reliability)*: матеріали міжнародної науково – практичної конференції (15 – 17 квітня 2020 р. Кропивницький, ЦНТУ). Кропивницький: 2020. С.119 – 124

32. M.S. Ageev, M.S. Chernovol, T.V. Smirnova Study of the spraying process and the influence of its factors on the properties of electric arc spraying coatings. *Modern questions production and repair in industry and in transport: materials of the 20th International Scientific and Technical Seminar* (March 23 – 29, 2020, Tbilisi, Georgia). Kyiv: 2020. P. 201 – 205.

33. М.С. Агеев Влияние параметров оборудования для электродугового напыления на факторы процесса напыления и свойства защитных покрытий для деталей судовых машин и механизмов: матеріали міжнародної науково – практичної конференції присвяченої пам'яті професорів Фоміна Ю.Я. і Семенова В.С. Одеса: 2020. С. 134 – 140.

34. М.С. Агеев, М.А. Белоцерковский Улучшение характеристик газотермических покрытий химико – термической обработкой. *Підвищення надійності машин і обладнання. (Increase of Machine and Equipment Reliability)*: матеріали міжнародної науково–практичної конференції (15 – 17 квітня 2020 р. Кропивницький, ЦНТУ). Кропивницький: 2020. С.74 – 80

35. А.П. Зиньковский, А.В. Рутковский, М.С. Агеев Влияние импульсного ионного азотирования на свойства покрытий, полученных электродуговым напылением. *Инновационные технологии в машиностроении: сборник материалов международной научно – технической конференции* (21 – 22 апреля 2020, ПГУ, г. Новополоцк). Новополоцк, Беларусь: 2020. С. 92 – 102.

36. М.С. Агеев, А.В. Рутковский, М.А. Белоцерковский Повышение свойств газотермических покрытий азотированием. *Инженерия поверхности и реновация изделий: материалы 20 – й международной научно – технической конференции* (1 – 5 червня 2020, Київ). Київ: 2020. С. 55 – 10.

37. М.С. Агеев, А.В. Дудан, Е.К. Соловых, Ю.В. Волков, Г.Ю. Васильченко Реставрация валов судовых дизель – генераторов покрытиями дискретной структуры: матеріали міжнародної науково – практичної конференції присвяченої пам'яті професорів Фоміна Ю.Я. і Семенова В.С. Одеса: 2019. С. 130 – 134.

38. А.П. Зиньковский, М.С. Агеев Целесообразность обработки ЭДН-покрытий термоцилическим ионным азотированием *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-201*: матеріали 10-ї міжнародної науково – практичної конференції (28 – 29 вересня 2019 р. ХДМА, м. Херсон). Херсон, 2019. С. 178 – 181.

39. М.С. Агеев, Л.М. Шпак, В.І Кавун. Using combined technology of coating deposition for renovation of ship diesel generator shafts: матеріали міжнародної науково–практичної конференції присвяченої пам'яті професорів Фоміна Ю.Я. і Семенова В.С. Одеса: 2019. С. 126 – 129.

40. Б.А. Ляшенко, М.С. Агеев, Л.А. Лопата Роль теорий адгезии в формировании упрочняющих покрытий. *Инженерия поверхности и реновация изделий*: матеріали 18 – і міжнародної науково – технічної конференції (4 – 8 червня 2018 р., Закарпатська обл., Свалява). Київ: АТМ України. 2018. С. 6 – 10.

41. Б.А. Ляшенко, М.С. Агеев, С.Л. Чиграй Управління дифузійним насиченням пористих покриттів в умовах термоциклічного іонного азотування *Инженерия поверхні і реновация виробів: матеріали 17-ї міжнародної науково-технічної конференції* (29 травня - 2 червня 2017 р., Одеса). Одеса: АТМ України. 2017. С. 111–114.

42. Б.А. Ляшенко, М.С. Агеев, С.С. Михайлюта Оценка удельной мощности двигателей внутреннего – сгорания с поршнями, обработанными импульсным азотированием. *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування (СЕУТТОО-2017)*: матеріали 8-ї міжнародної науково-практичної конференції (28 – 29 вересня 2017 р. ХГМА, м. Херсон). Херсон: 2017. С. 451 – 455.

43. М.С. Агеев, В.Н. Лопата, М.А. Белоцерковский Структурные особенности в стальных газотермических покрытиях и возможности их использования *Сучасні проблеми підготовки, виробництва і ремонту в промисловості і на транспорті*: матеріали 16 – го міжнародного науково – технічного семінару (22 – 26 лютого 2016 р., Закарпатська обл., Свалява). Київ: АТМ України. 2016. С. 12 – 16.

44. Б.А. Ляшенко, М.С. Агеев Анализ информационных потоков, тенденций и основные стратегические направления развития судостроительной и судоремонтной отрасли. *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології і обладнання для їх обслуговування (СЕУТТОО – 2015)*: матеріали 6 – ої міжнародної науково – практичної конференції (24 – 25 вересня 2015 р., ХДМА, м. Херсон,). Херсон: 2015. С. 250 – 252

45. С.К. Фомичев, В.Н. Лопата, М.С. Агеев, А.В. Ворона Восстановление и упрочнение быстроизнашивающихся деталей бронетранспортеров электродуговым напылением. *Якість, стандартизація і контроль: теорія і практика*: матеріали 15-ої міжнародної науково–практичної конференції (15 – 18 вересня 2015 р., Одеська область, Затока). Київ: АТМ України, 2015. С. 184 – 188.

46. Волков Ю.В., Агеев М.С., Соловых Е.К. Восстановление валов судовых дизельных генераторов электроконтактным припеканием покрытий дисктерной структуры. *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології і обладнання для їх обслуговування СЭУТТОО-2015*: матеріали 6 – ої міжнародної науково - практичної конференції (24 – 25 вересня 2015 г., ХДМА, м. Херсон). Херсон: 2015. С. 262 – 263.

47. М.С. Агеев, Е.Е. Кожевникова, С.Л. Чиграй Метод повышения ресурса судовых насосов на основе комбинированной технологии восстановления. *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології і обладнання для їх обслуговування (СЕУТТОО –2015)*: матеріали 6 - ої міжнародної науково – практичної конференції (24 – 25 вересня 2015 р., ХДМА, м. Херсон). Херсон: ХДМА, 2015. С. 57 – 58.

48. Б.А. Ляшенко, М.С. Агеев Исследование термоциклической ползучести и длительной прочности покрытий на ниобиевых сплавах. *Качество,*

стандартизація, контроль: теорія і практика: матеріали 16 – ой міжнародної науко – практичної конференції. (20 – 23 вересня 2016, Одеса). Одеса: 2016. С. 184 – 188.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

49. Спосіб нанесення покриття з композиційного матеріалу на деталі машин. Патент №130155 Україна: В22F 7/00, С23С 30/00 (2006), опубл. 26.11.2018, Бюл. № 22. 6 с.

АНОТАЦІЯ

Агєєв М.С. Наукові основи забезпечення надійності засобів транспорту та їх елементів використанням багатофункціональних покриттів в процесі ремонту. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту – Харківський національний автомобільно-дорожній університет, МОН України, м. Харків, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково – технічної проблеми забезпечення надійності та управління ресурсом деталей засобів транспорту та їх елементів шляхом застосування багатофункціональних покриттів в процесі ремонту.

Запропоновано концепцію забезпечення надійності відновлених деталей засобів транспорту, яка враховує структурні та морфологічні особливості поверхонь після електроіскрового легування, вплив складу і властивостей газотермічного потоку на процес формування покриттів при електродуговому напиленні, характеристики матеріалу для відновлення та вплив модифікуючої дії імпульсного іонного азотування на покриття, що отримані електродуговим напиленням.

Ключові слова: елементи засобів транспорту, деталі, багатофункціональні покриття, електродугове напилення, електроіскрове легування, комбінований спосіб, експлуатаційні властивості, адгезія, міцність зчеплення, щільність, мікротвердість, зносостійкість

АННОТАЦИЯ

Агєєв М.С. Научные основы обеспечения надежности средств транспорта и их элементов применением многофункциональных покрытий в процессе ремонта. – Квалификационная научная работа на правах рукописи

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.20 – эксплуатация и ремонт средств транспорта. – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет МОН Украины. – Харьков, 2021.

Развитие современных средств наземного и водного транспорта неразрывно связано с проблемой повышения срока службы их деталей, узлов и агрегатов. Способы повышения срока службы, долговечности и износостойкости деталей узлов и агрегатов средств транспорта достаточно изучены, отработаны и продолжают совершенствоваться.

Установлено, что основными теоретическими проблемами, которые препятствуют реализации потенциальных возможностей комбинированных и интегрированных технологий нанесения многофункциональных покрытий для восстановления и повышения эксплуатационных свойств элементов средств транспорта, является отсутствие научных основ анализа и синтеза процессов модификации поверхностного слоя деталей средств транспорта с целью повышения физико-механических характеристик в любых условиях эксплуатации, что сдерживает научное обоснованное их использования.

Показано, что подход к определению закономерностей влияния многофункциональных упрочняющих покрытий на характеристики прочности сцепления и износостойкости создаст основу для разработки принципа управления процессом восстановления с целью получения максимальных эксплуатационных показателей надежности средств транспорта различного назначения.

Однако, несмотря на большой объём выполненных исследований и проведённых экспериментальных работ, к настоящему времени проблема повышения износостойкости и долговечности наиболее востребованных и дорогостоящих деталей узлов и агрегатов транспортных средств остается актуальной.

Одним из эффективных средств решения этой проблемы является применение многофункциональных покрытий. Разработанный комбинированный способ получения многофункциональных покрытий включает в себя: электроискровое легирование, электродуговое напыление и импульсное ионное азотирование. Целесообразность метода электроискрового легирования обоснована повышением прочности сцепления напыленных покрытий с поверхностью восстанавливаемой детали. Для получения покрытий с низкой пористостью и высокой прочностью сцепления подтверждена необходимость электродугового напыления в струе продуктов сгорания пропано-воздушной смеси. Определено влияние параметров электродугового напыления на физико-механические свойства восстановленных поверхностей (пористость, микротвердость, прочность сцепления, износостойкость и коррозионную стойкость). Разработан комбинированный способ восстановления деталей транспортных средств путем оптимизации процесса нанесения покрытий выбора их материала, управления его составом и структурой в процессе ремонта позволил повысить их эксплуатационные свойства более чем в 2 раза по сравнению с традиционными способами и решить задачу обеспечения их ресурса, который не уступает ресурсу новых деталей.

Комплексное сочетание технологических приемов нанесения покрытий может обеспечить не только восстановление геометрических размеров деталей, но и восстановить их эксплуатационные свойства, а соответственно и продлить их ресурс.

Ключевые слова: детали средств транспорта, многофункциональные покрытия, электродуговое напыление, импульсное ионное азотирование, электроискровое легирование, комбинированный способ, эксплуатационные свойства, адгезия, прочность сцепления, плотность, микротвердость, твердость, износостойкость.

ABSTRACT

Ageev M.S. Scientific bases of ensuring the reliability of vehicles and their elements using multifunctional coatings in the repair process. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of technical sciences for specialty 05.22.20 - operation and repair of vehicles - Kharkiv National Automobile and Road University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The dissertation work is devoted to the decision of a scientific and technical problem of maintenance of reliability and management of a resource of details of vehicles and their elements by application of a multipurpose covering in the course of repair.

The concept of ensuring the reliability of the restored parts of vehicles, which takes into account the structural and morphological features of surfaces after electrospark doping, the influence of composition and properties of gas thermal flow on the process of forming coatings by electric arc spraying, the characteristics of the material for restoration and electric arc spraying.

Keywords: elements of vehicles, parts, multifunctional coatings, electric arc spraying, electrospark alloying, combined method, performance properties, adhesion, adhesion strength, density, microhardness, wear resistance.

Відповідальний за випуск *Р.С. Врублевський*
Друк, фальцювальні-палітурні роботи *В.Г. Удов*

Формат 60x84/16. Папір офсетний.
Ум. друк. арк. 2,5
Підписано до друку року 09.08.2021
Тираж 100 примірників.

Видавництво
«Херсонська державна морська академія»,
Просп. Ушакова, 20, м. Херсон, 73000
Тел.: 49-20-20
Ел. адреса: rvv@ksma.ks.ua

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої
Справи до Державного реєстру
ДК № 4319 від 10.05.2012

